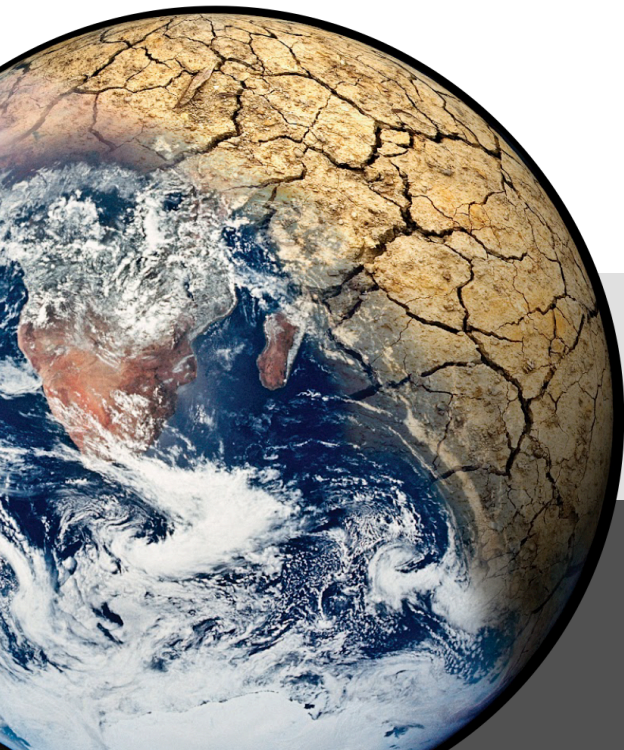


# **Breve Historia del Clima: Una mirada del pasado hacia el futuro**



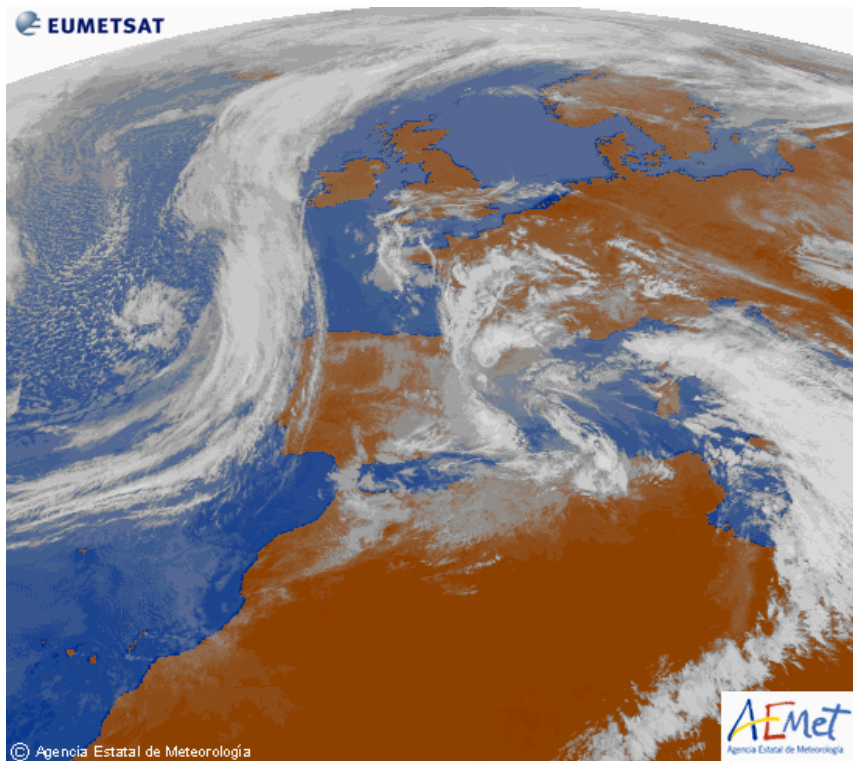
Pablo Ortega Montilla

Departamento de Ciencias de la Tierra  
Centro Nacional de Supercomputación (Barcelona)

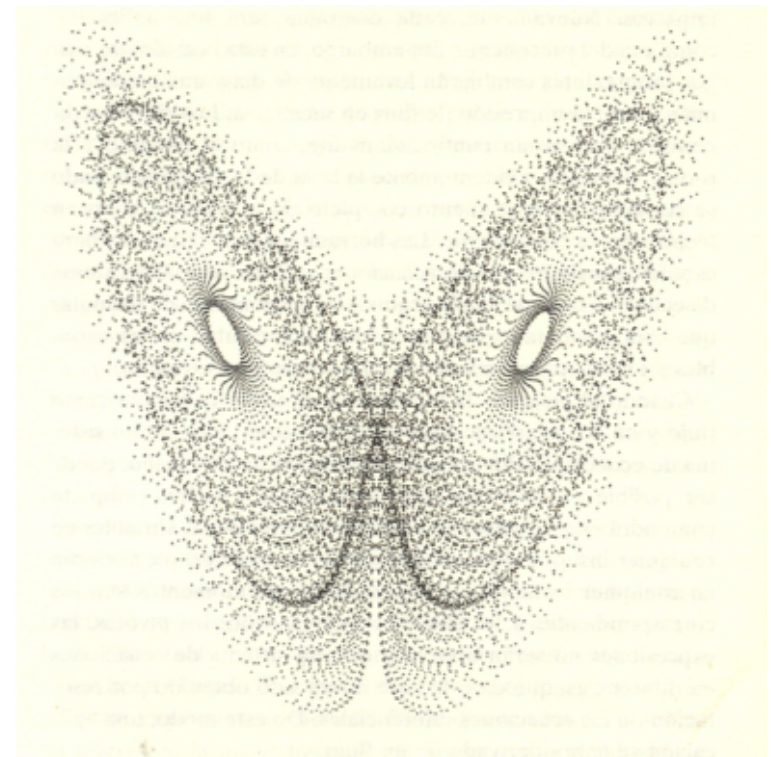
# Diferencia entre Tiempo y Clima

## Tiempo Meteorológico:

Estado de la atmósfera en un día concreto



Predicción Meteorológica  
(hasta 10 días)



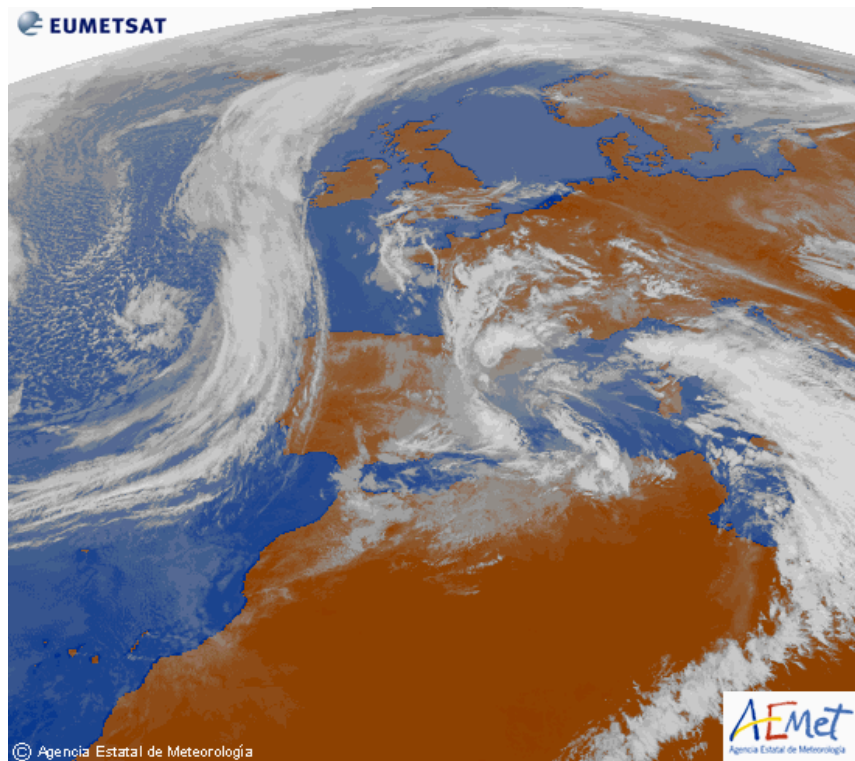
Efecto Mariposa



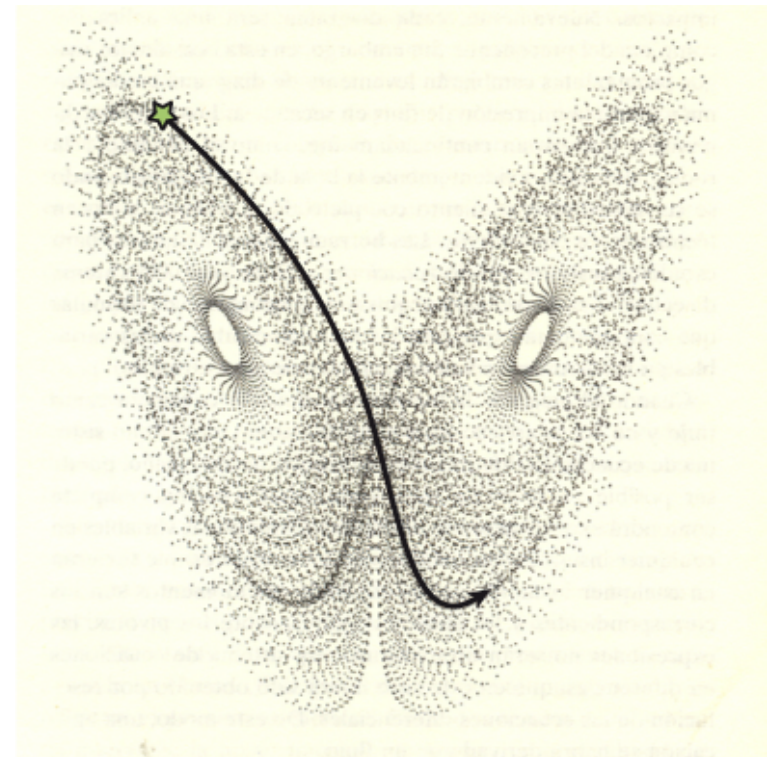
# Diferencia entre Tiempo y Clima

## Tiempo Meteorológico:

Estado de la atmósfera en un día concreto



Predicción Meteorológica  
(hasta 10 días)

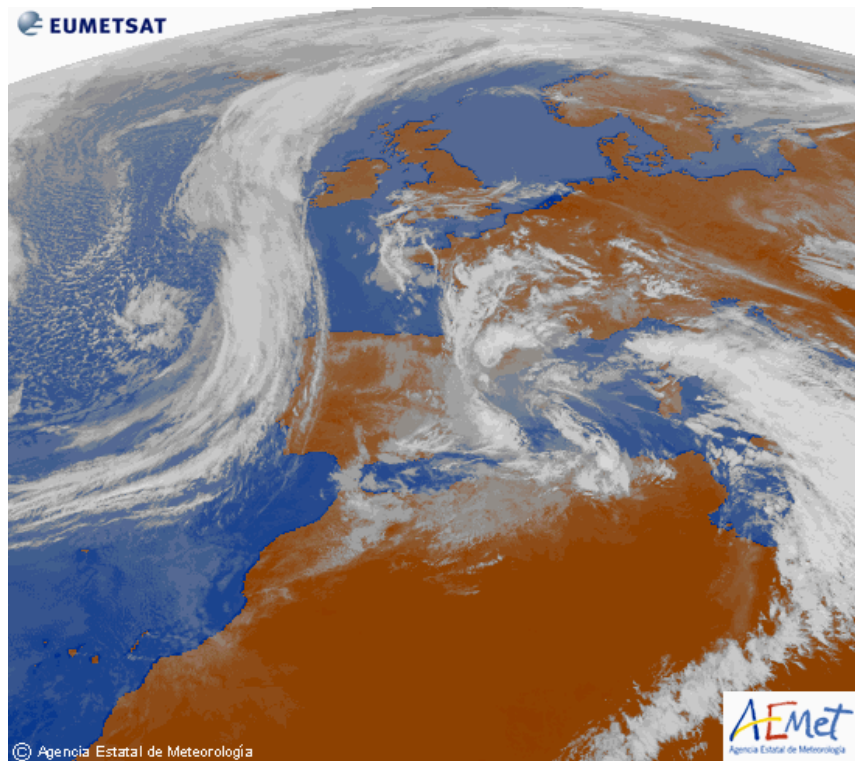


Efecto Mariposa

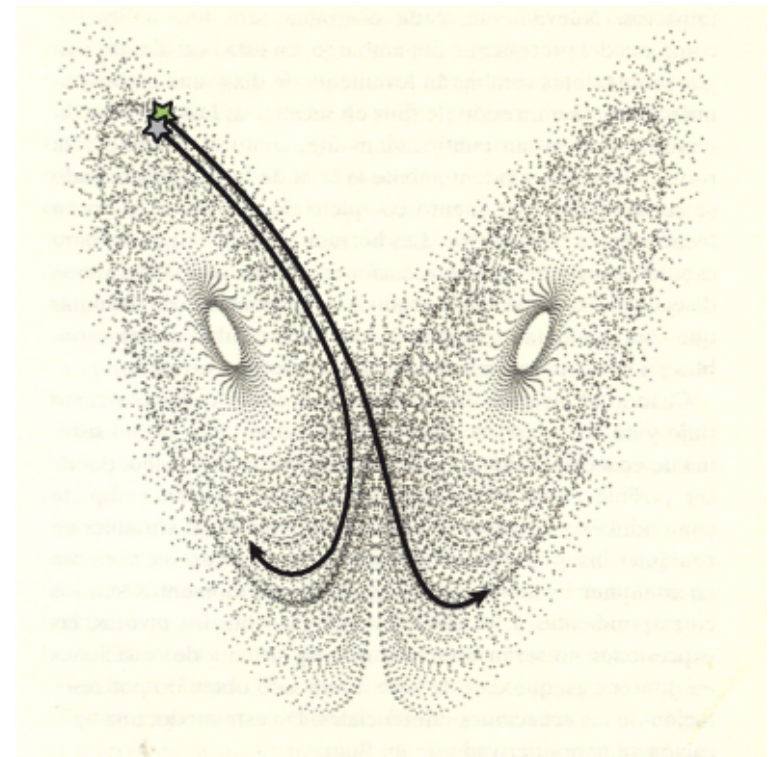
# Diferencia entre Tiempo y Clima

## Tiempo Meteorológico:

Estado de la atmósfera en un día concreto



Predicción Meteorológica  
(hasta 10 días)



Efecto Mariposa



# Diferencia entre Tiempo y Clima

## Clima:

Tiempo característico de una zona concreta

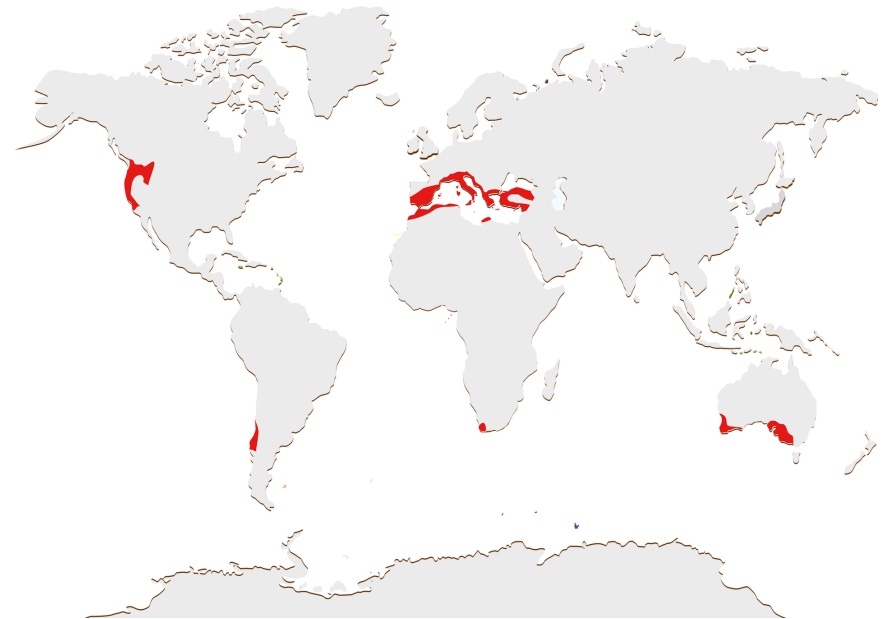


### **Clima mediterráneo**

Inviernos (templados y lluviosos)

Veranos (secos y calurosos)

Primavera/Otoño (variables)



### **Se caracteriza por:**

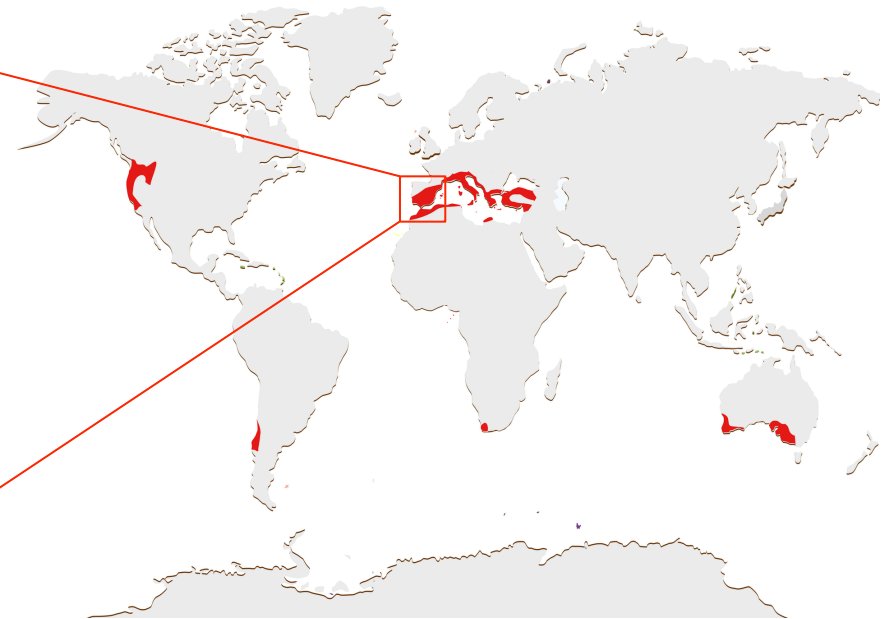
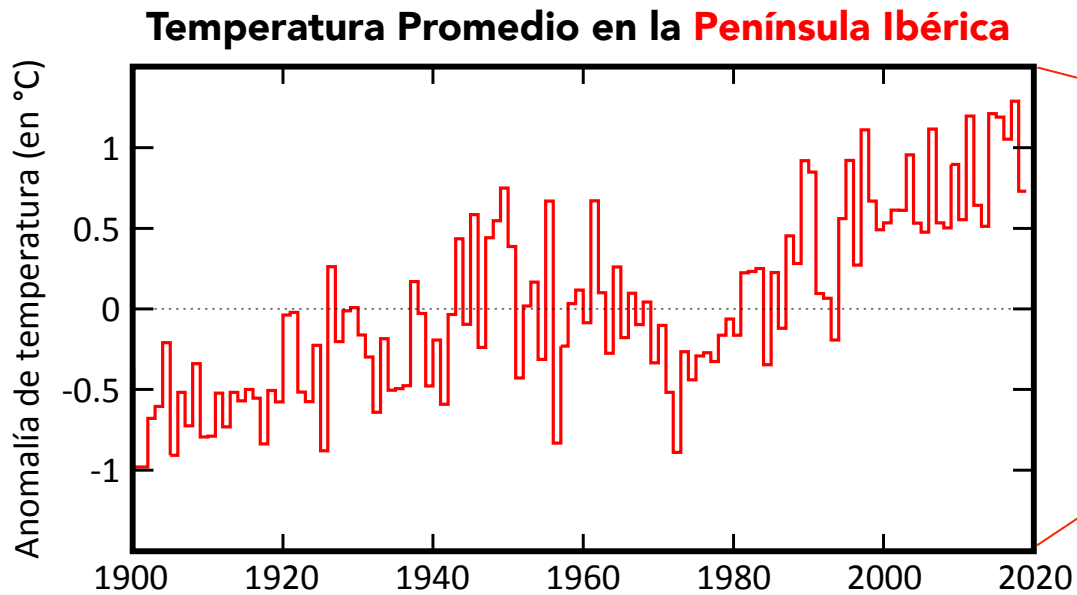
Estado promedio



# Diferencia entre Tiempo y Clima

## Clima:

Tiempo característico de una zona concreta

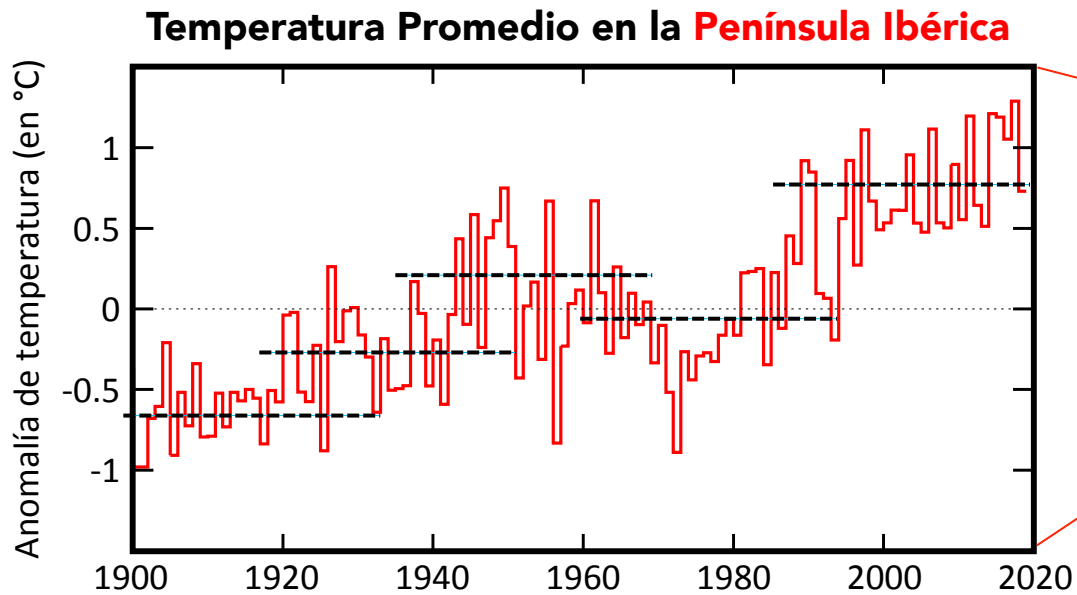


**Se caracteriza por:**  
Estado promedio

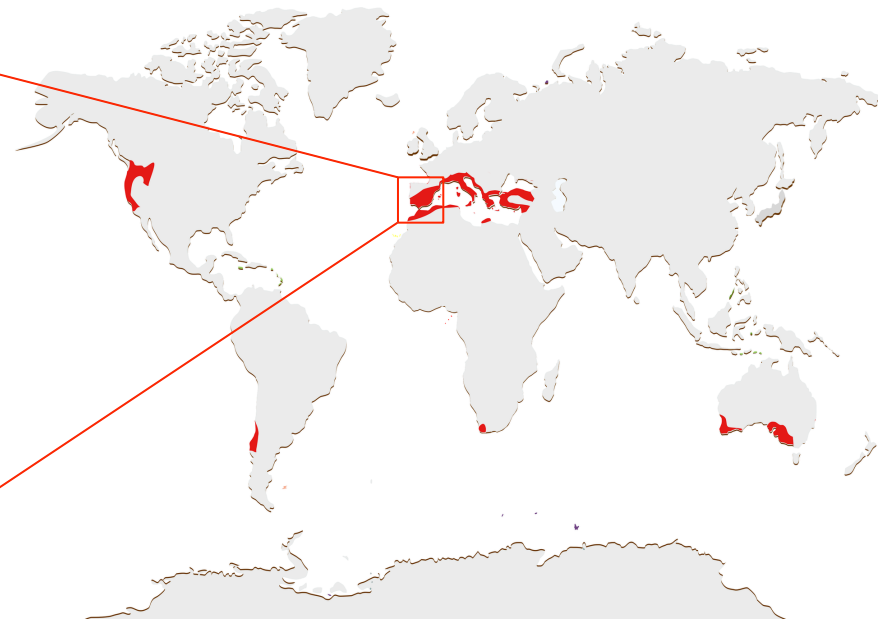
# Diferencia entre Tiempo y Clima

## Clima:

Tiempo característico de una zona concreta



No todos los periodos del **siglo XX** tuvieron el mismo estado promedio

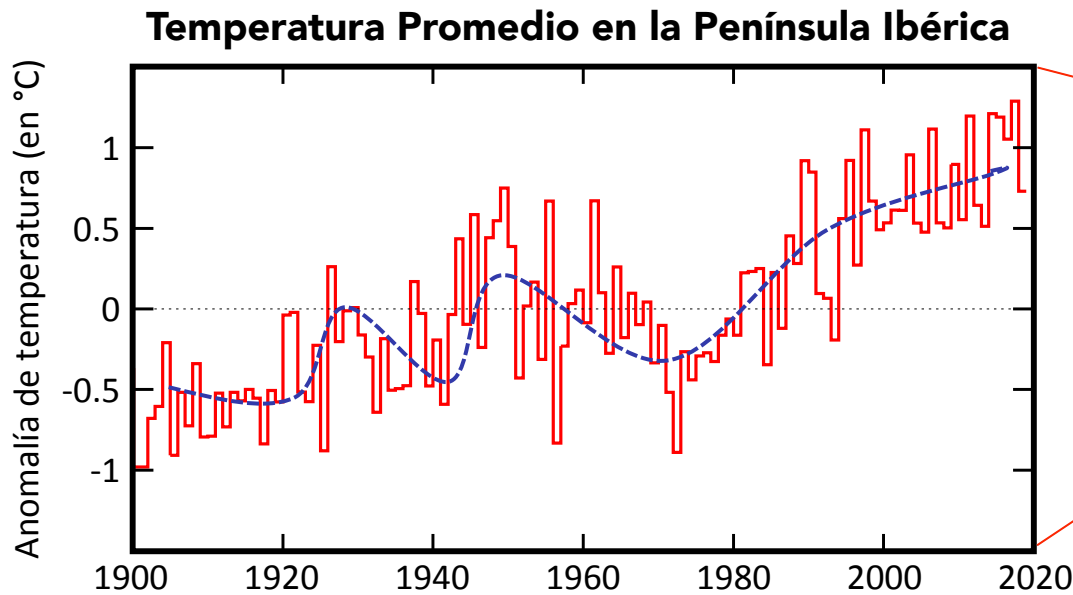


**Se caracteriza por:**  
Estado promedio

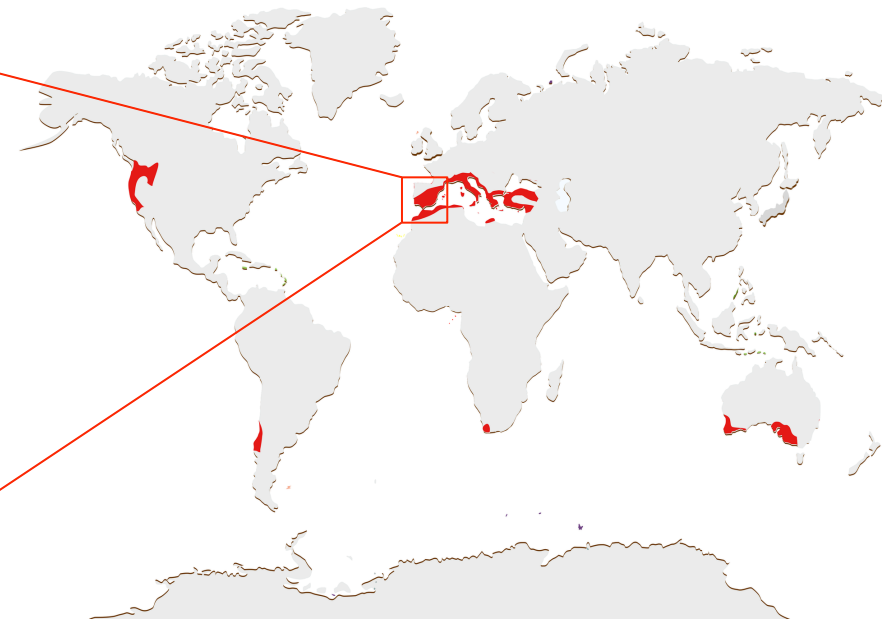
# Diferencia entre Tiempo y Clima

## Clima:

Tiempo característico de una zona concreta



No todos los periodos del **siglo XX** tuvieron el mismo estado promedio



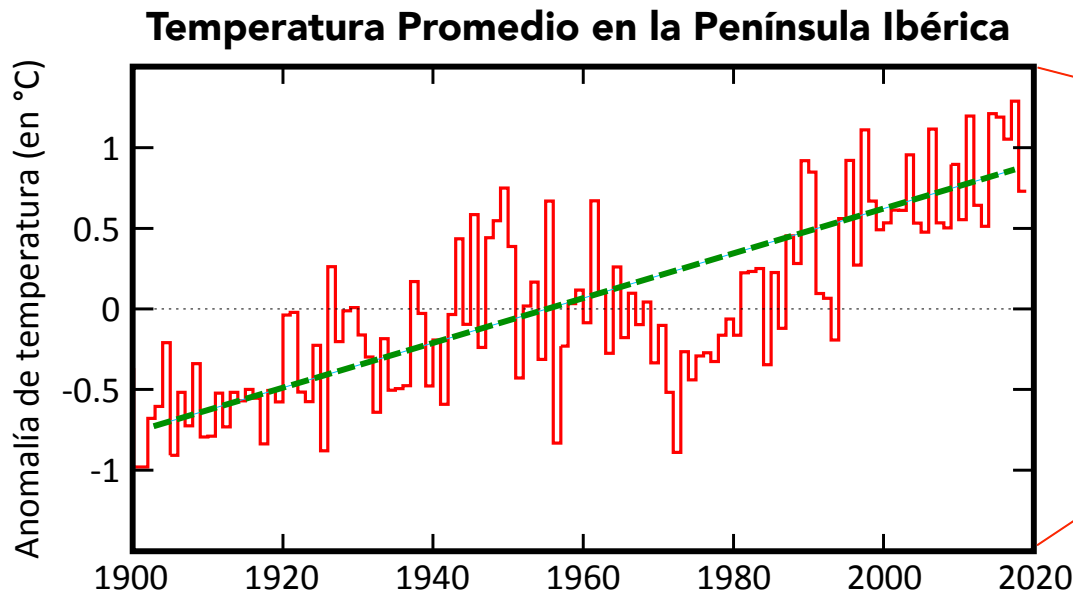
**Se caracteriza por:**  
Estado promedio + Variaciones



# Diferencia entre Tiempo y Clima

## Clima:

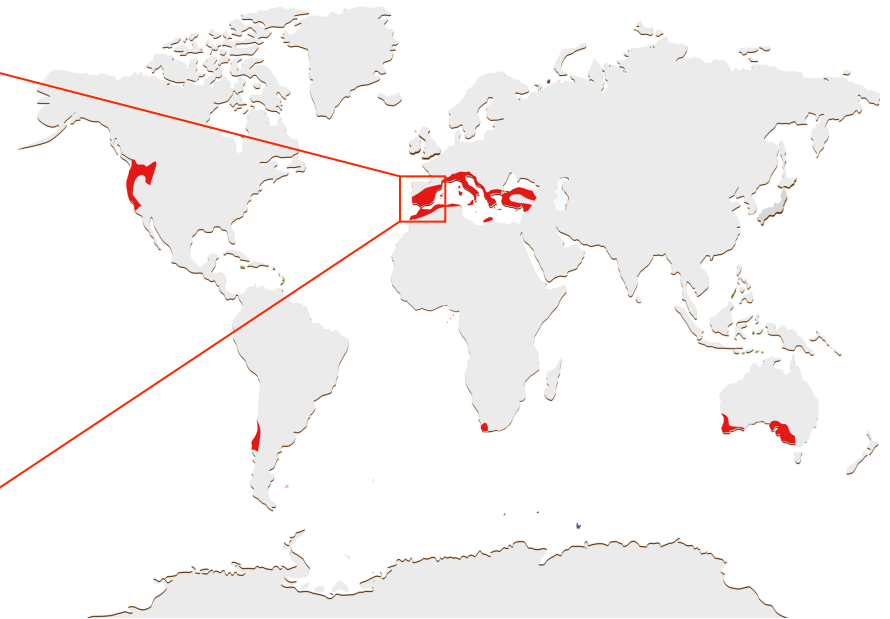
Tiempo característico de una zona concreta



No todos los periodos del **siglo XX** tuvieron el mismo estado promedio

**¿Qué define un cambio climático?**

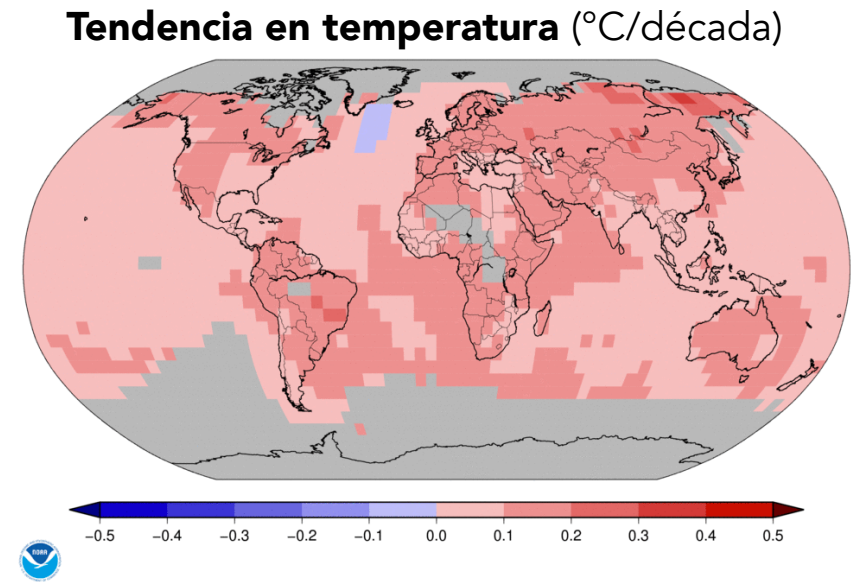
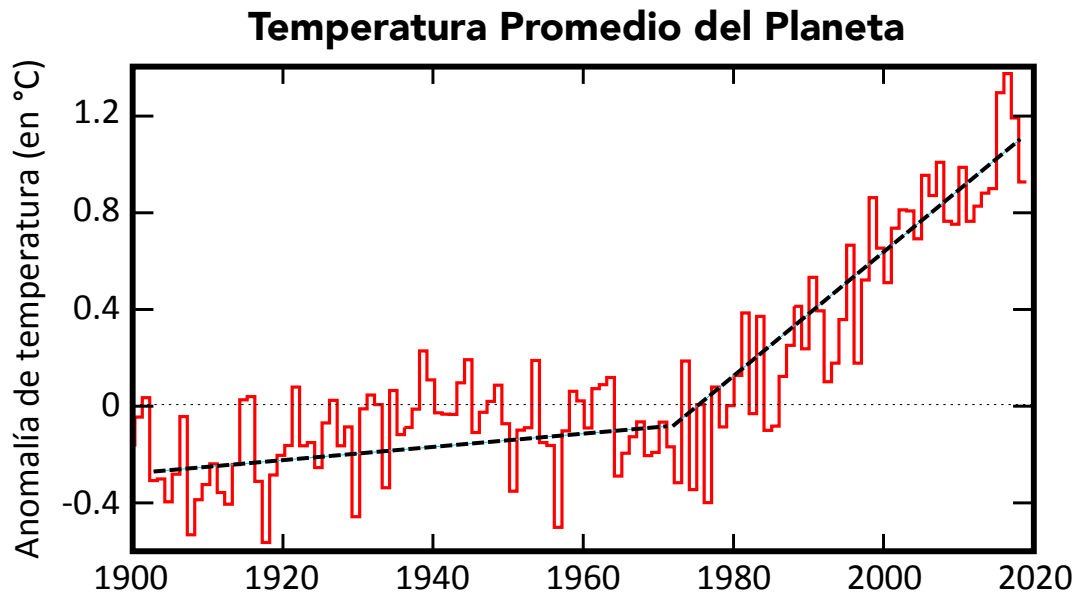
Un cambio en el estado promedio a largo plazo (o de sus variaciones)



**Se caracteriza por:**  
Estado promedio + Variaciones

# ¿Cambio climático? ¿o calentamiento global?

Tendencias en temperatura desde principios del siglo XX



El calentamiento no **se ha producido siempre al mismo ritmo**

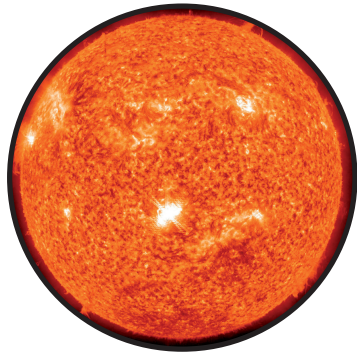
**No todas las zonas** se están calentando igual

Hay zonas, como el sur de Groenlandia, que se **están enfriando**

**¿Cuáles son las causas del calentamiento y de las diferencias regionales?**

# Causas de las variaciones observadas

## I) Factores externos al sistema climático



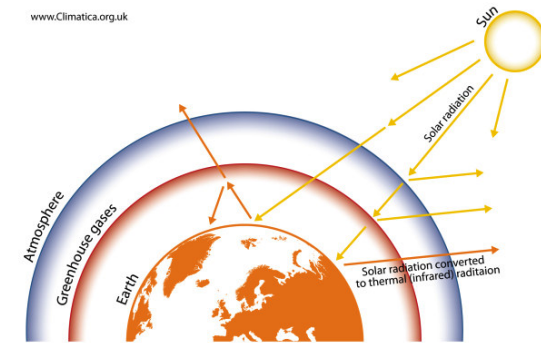
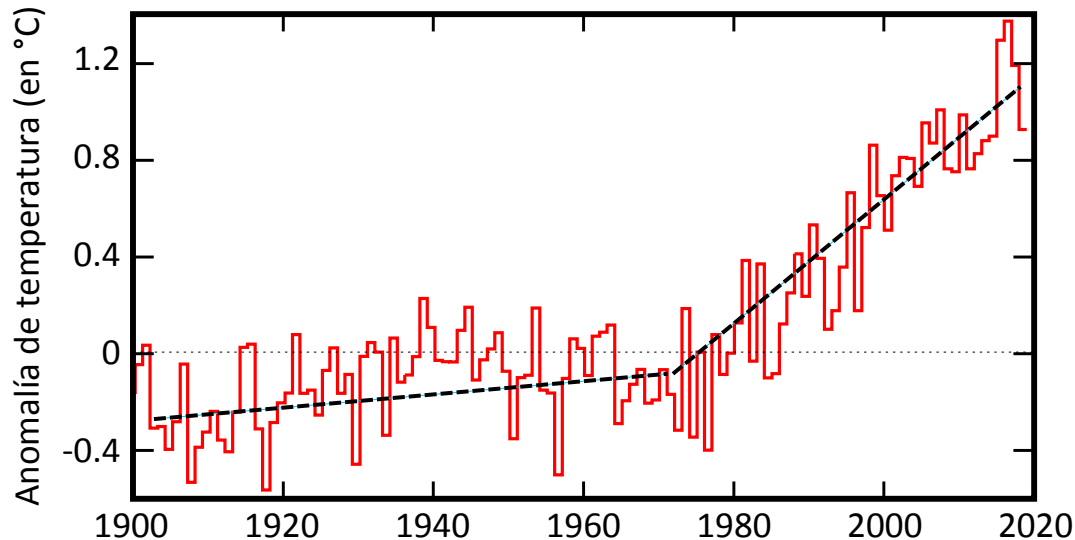
Actividad Solar



Aerosoles volcánicos

### Factores Naturales

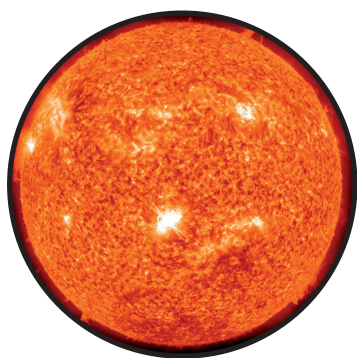
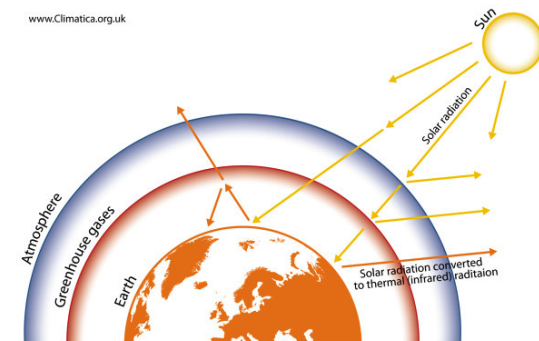
#### Temperatura Promedio del Planeta





# Causas de las variaciones observadas

## I) Factores externos al sistema climático



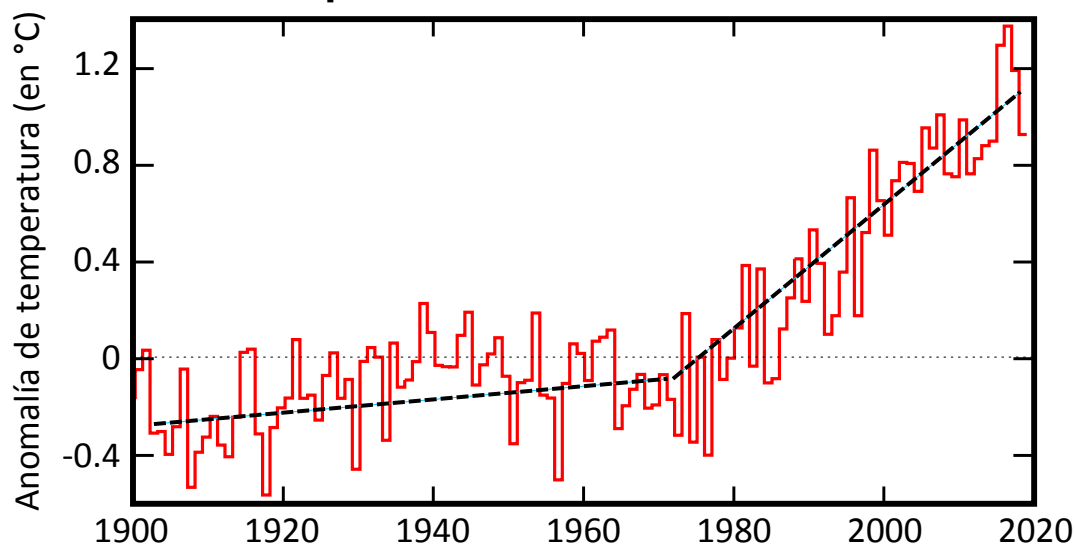
Actividad Solar



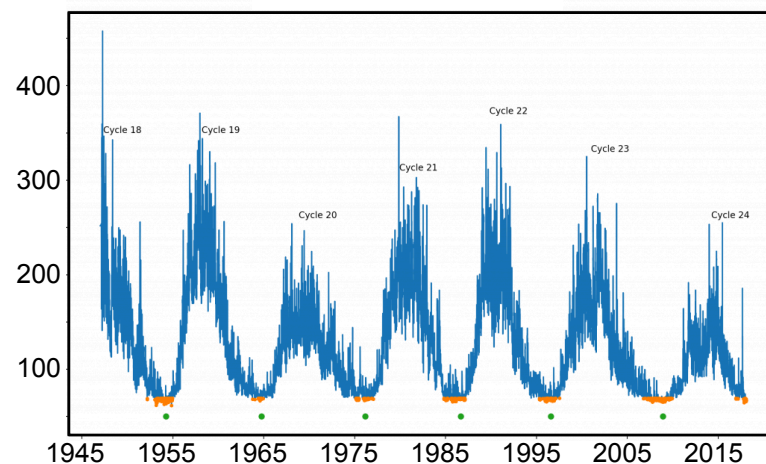
Aerosoles volcánicos

## Factores Naturales

### Temperatura Promedio del Planeta

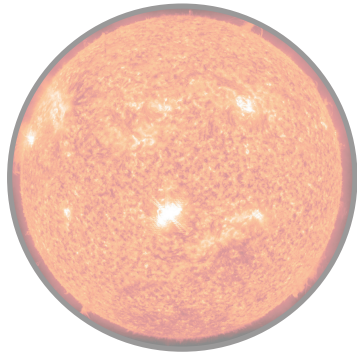


### Actividad solar



# Causas de las variaciones observadas

## I) Factores externos al sistema climático



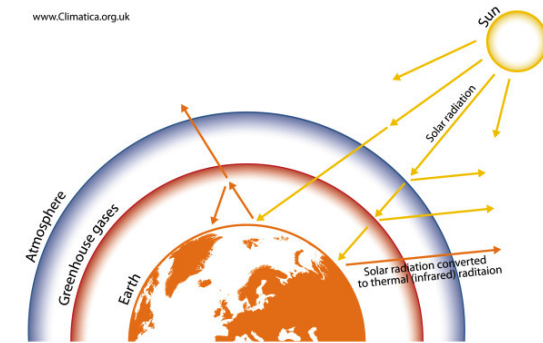
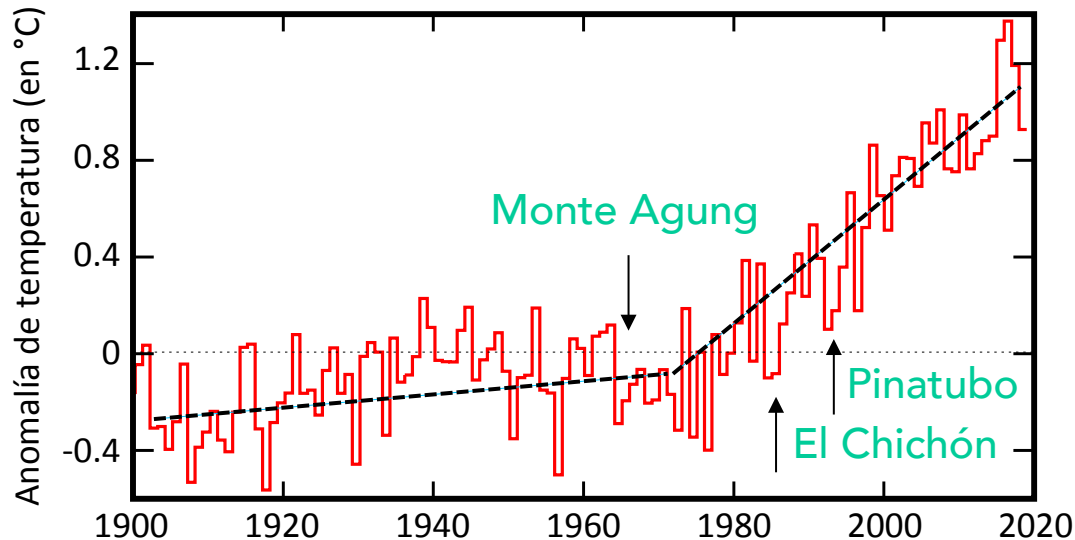
Actividad Solar



Aerosoles volcánicos

### Factores Naturales

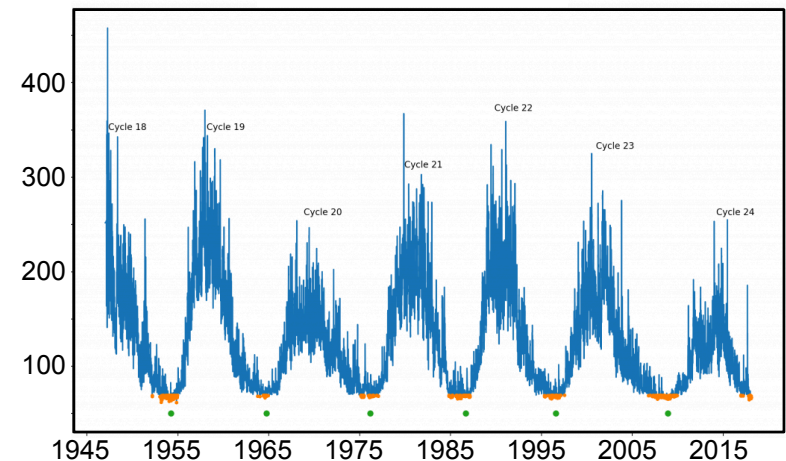
#### Temperatura Promedio del Planeta



#### Efecto pantalla ceniza volcánica

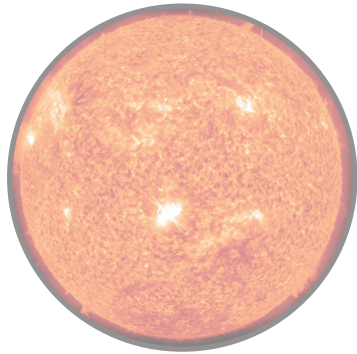
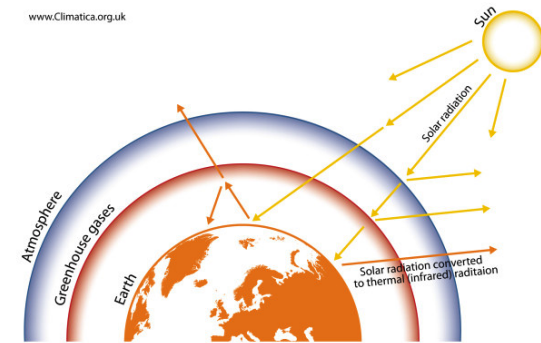


#### Actividad solar



# Causas de las variaciones observadas

## I) Factores externos al sistema climático



Actividad Solar



Aerosoles volcánicos

### Factores Naturales



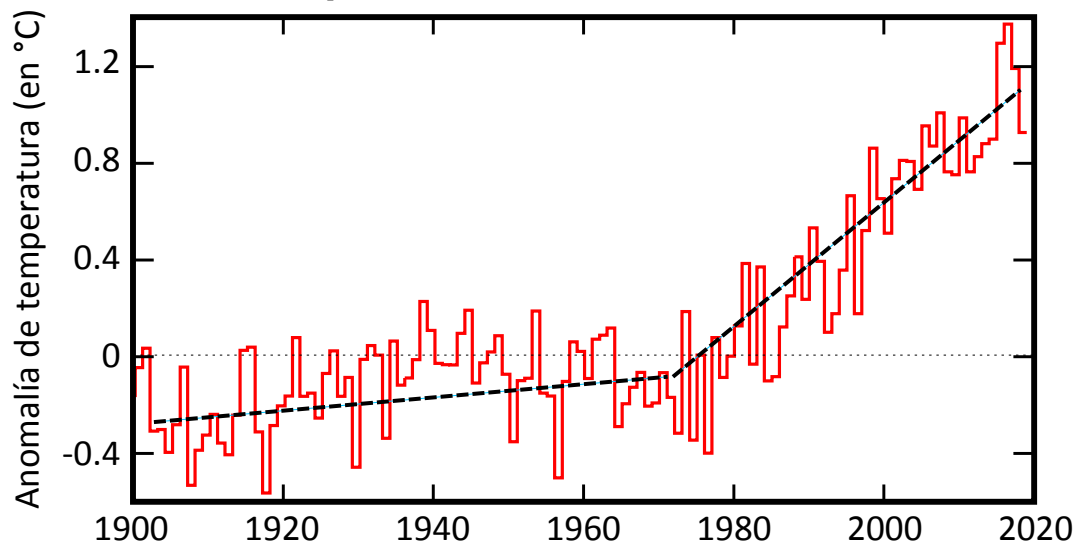
Gases Efecto Invernadero



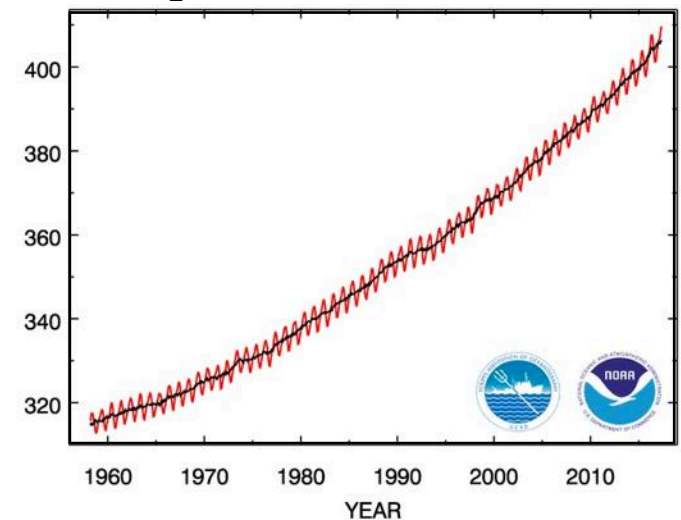
Usos de suelo

### Factores Antrópicos

### Temperatura Promedio del Planeta



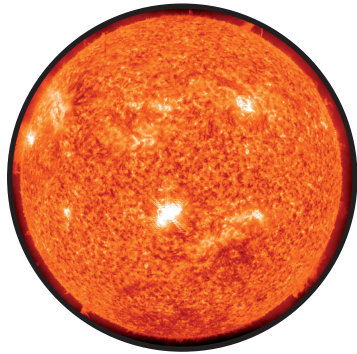
### CO<sub>2</sub> atmosférico (Mauna Loa)





# Causas de las variaciones observadas

## I) Factores externos al sistema climático



Actividad Solar



Aerosoles volcánicos



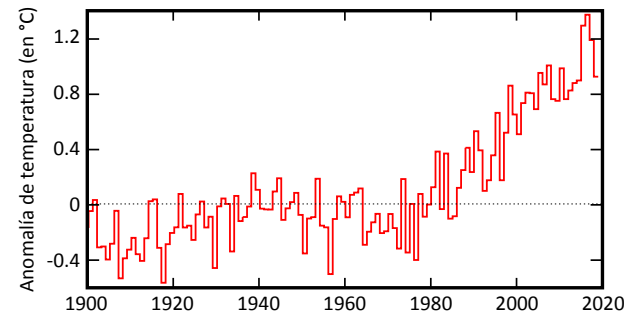
Gases Efecto Invernadero



Usos de suelo

**Factores Naturales**

**Factores Antrópicos**



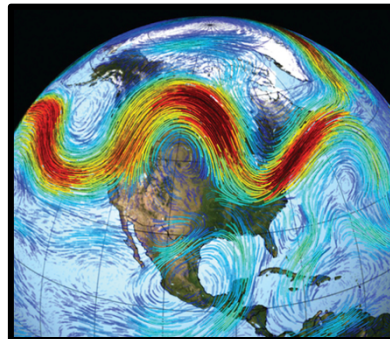
## II) Factores internos al sistema climático

**Procesos de variabilidad interna** (asociados a la memoria del sistema climático)

Océano



Atmósfera

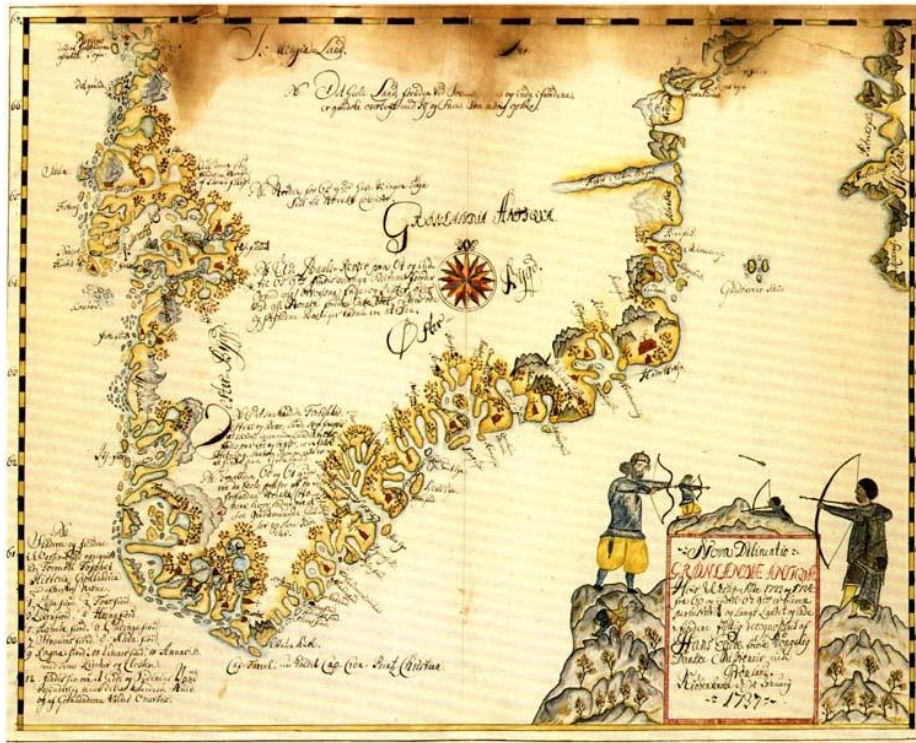


Criosfera



# Ejemplos de procesos de variabilidad interna

## La Oscilación del Atlántico Norte



Mapa original a color de Groenlandia por Hans Egede en 1737 (Royal Library de Dinamarca)

*“En Groenlandia, todos los inviernos son severos, pero no de igual forma. Los daneses han notado que cuando el invierno en Dinamarca es especialmente severo, el invierno en Groenlandia es a su manera leve o suave, y viceversa”.*

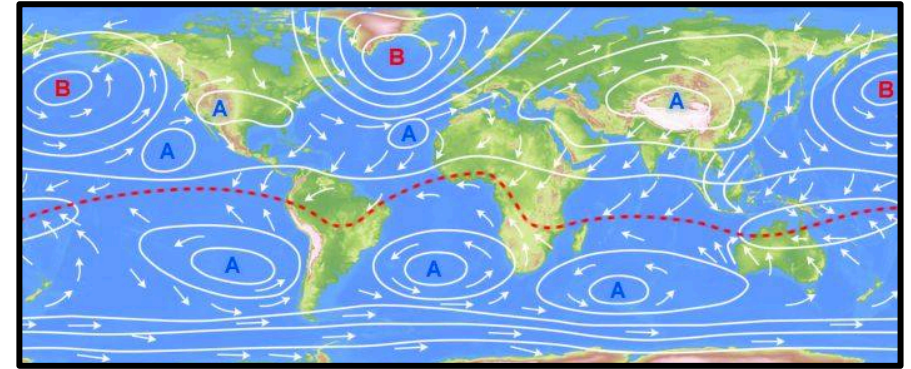
Hans Egede Saabye, misionero danés, 1745

# Ejemplos de procesos de variabilidad interna

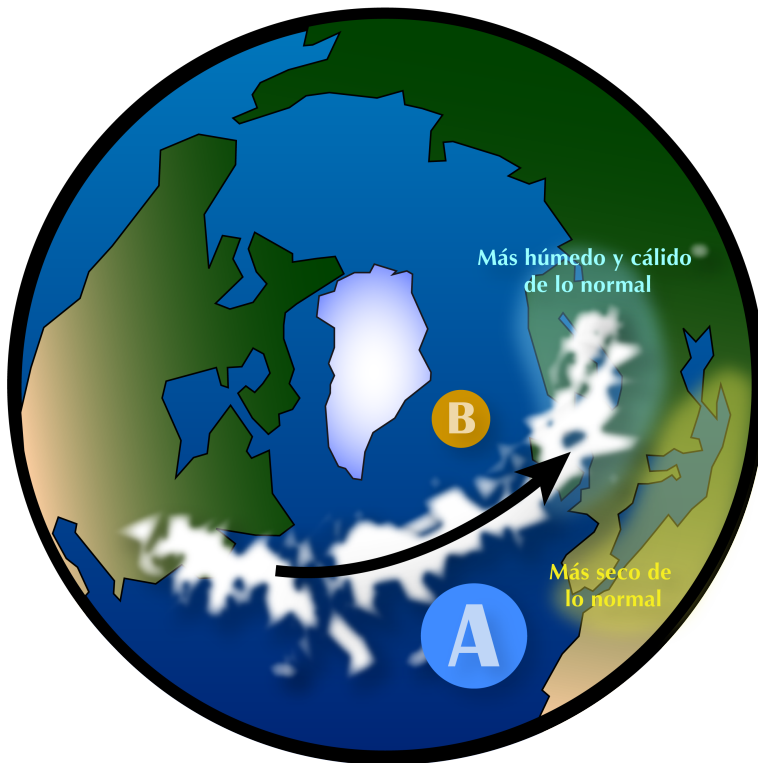
## La Oscilación del Atlántico Norte

Principal fuente de variabilidad climática de invierno en Europa

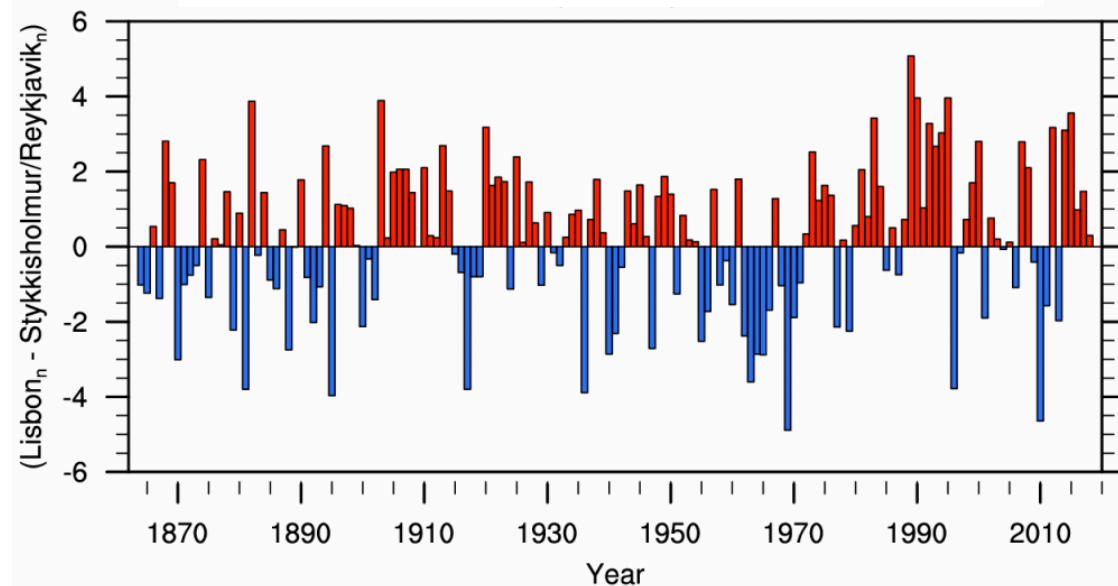
Sistema semipermanente de presiones



### Fase Positiva



### Oscilación Atlántico Norte: 1864-2018



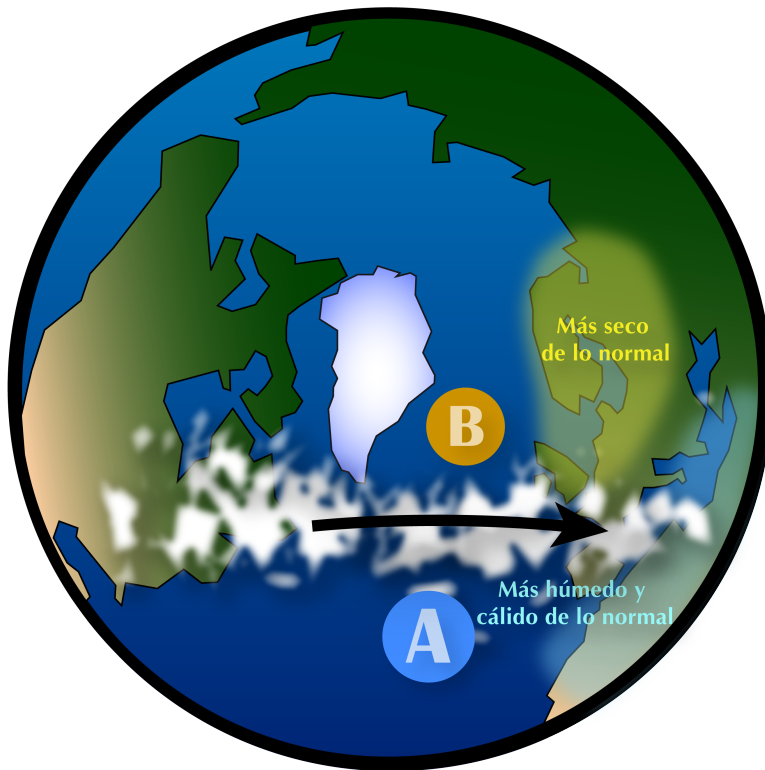


# Ejemplos de procesos de variabilidad interna

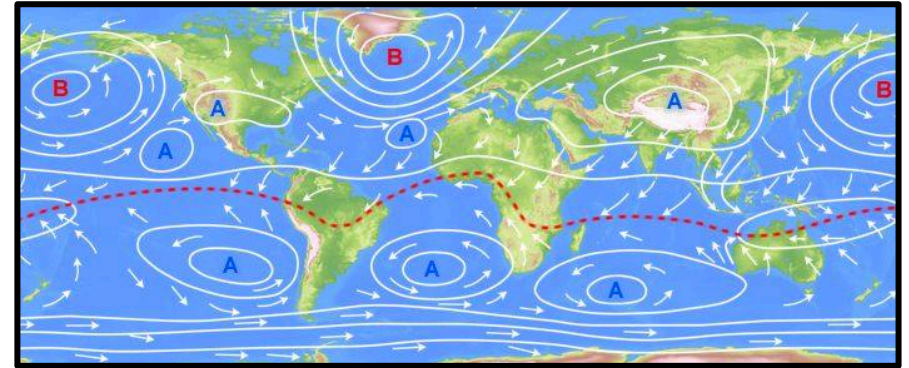
## La Oscilación del Atlántico Norte

Principal fuente de variabilidad climática de invierno en Europa

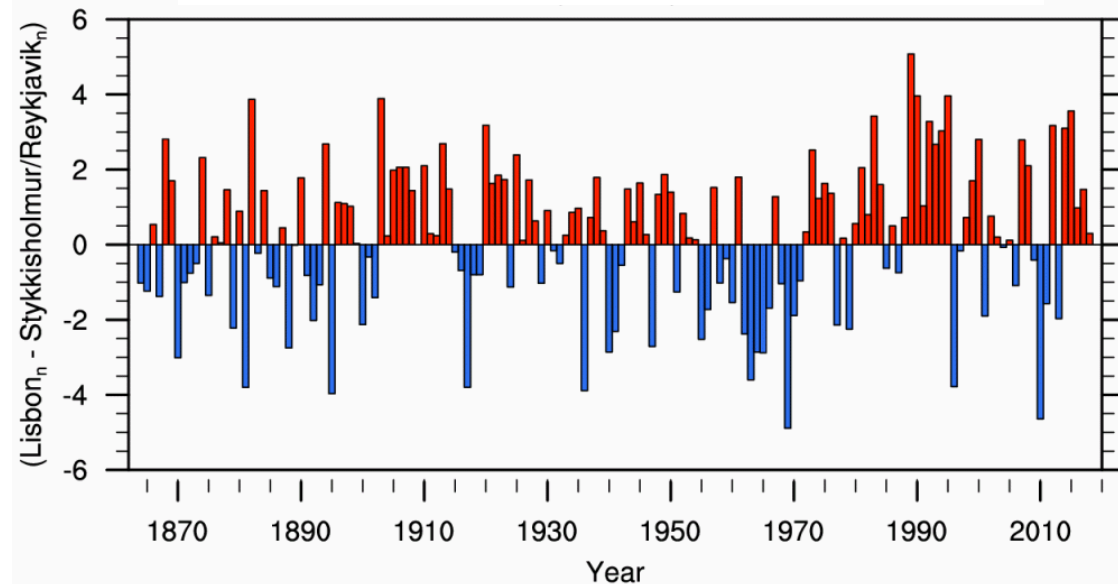
### Fase Negativa



Sistema semipermanente de presiones



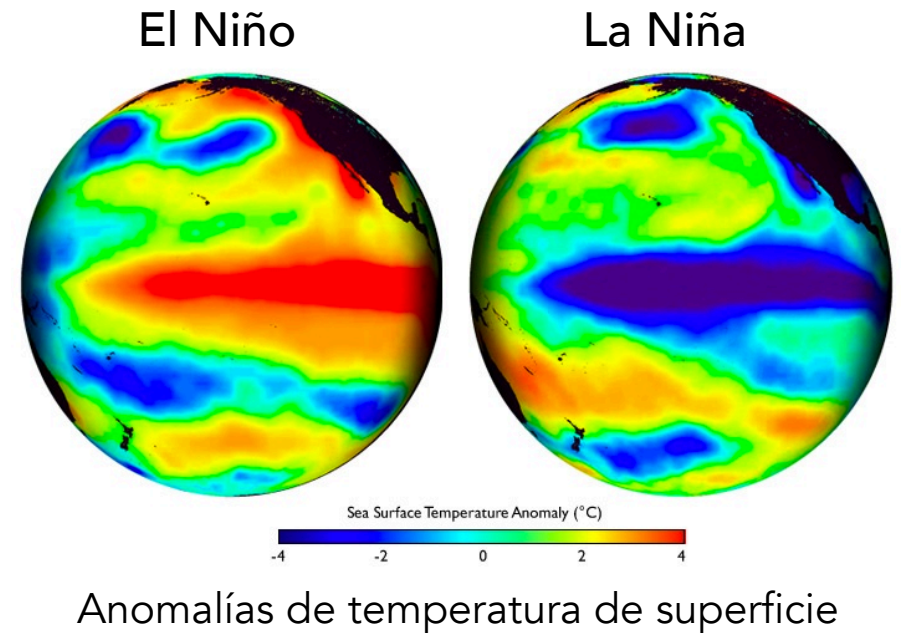
Oscilación Atlántico Norte: 1864-2018



# Ejemplos de procesos de variabilidad interna

## El Niño – Oscilación del Sur

Principal fuente de variabilidad interna (en periodos de 2 a 7 años)



Aunque se da en el océano Pacífico Tropical está ligado a numerosos impactos climáticos en toda la Tierra

# Ejemplos de procesos de variabilidad interna

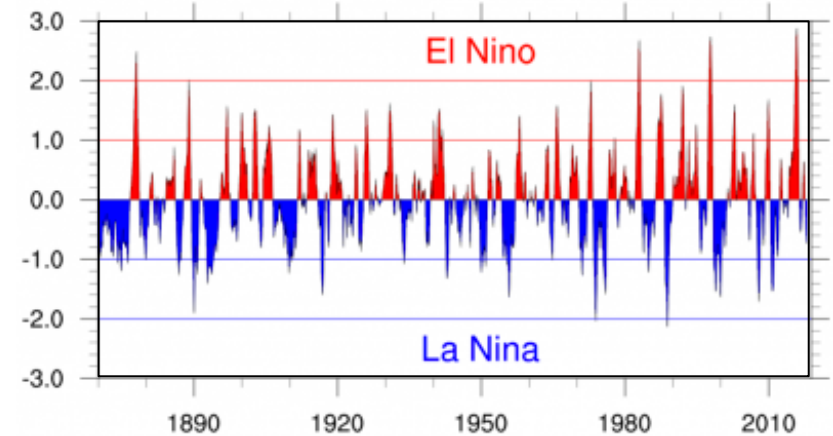
## Impactos climáticos asociados: **fase Niña**

### Precipitación

Más húmedo Más seco

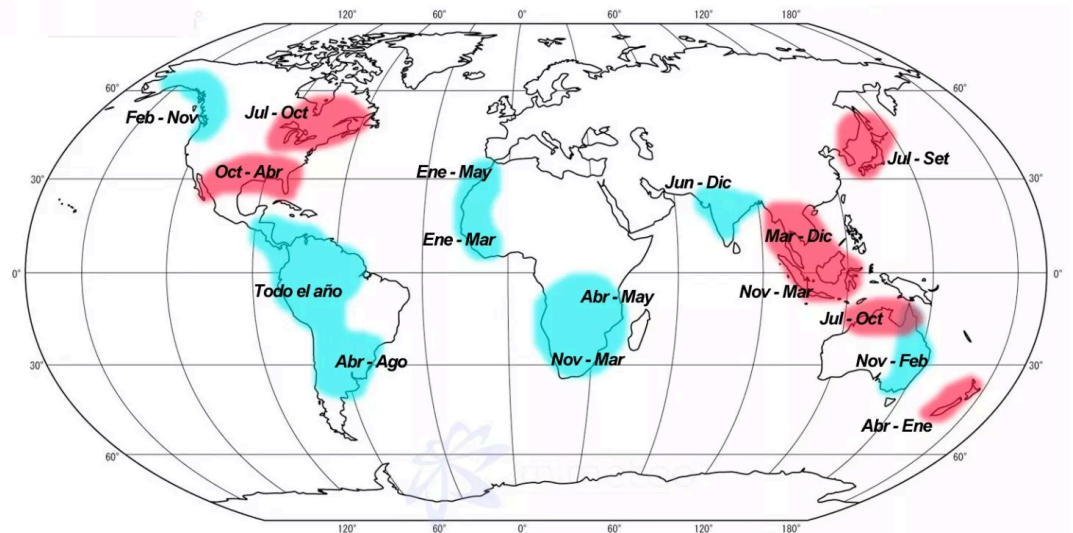


## El Niño-Oscilación del Sur: 1870-2018



### Temperatura

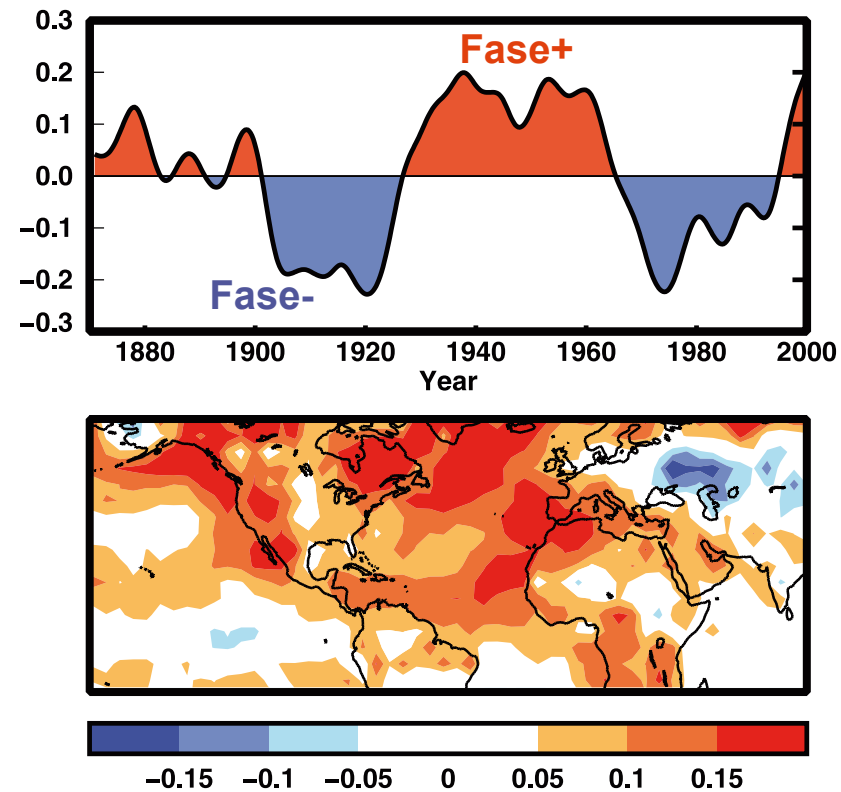
Más cálido Más frío





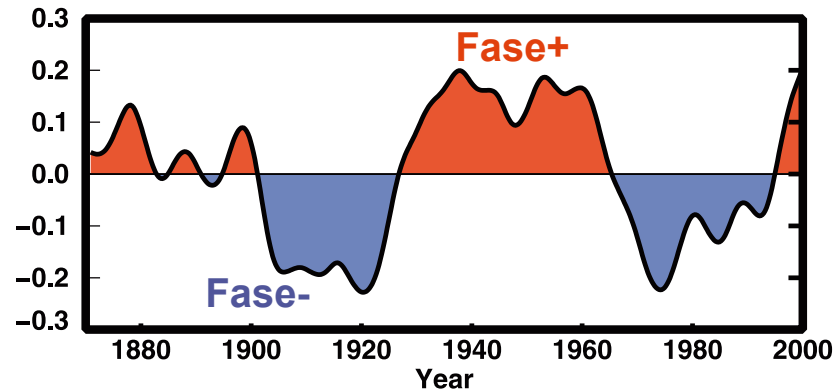
# Ejemplos de procesos de variabilidad interna

## Variabilidad Multidecadal del Atlántico

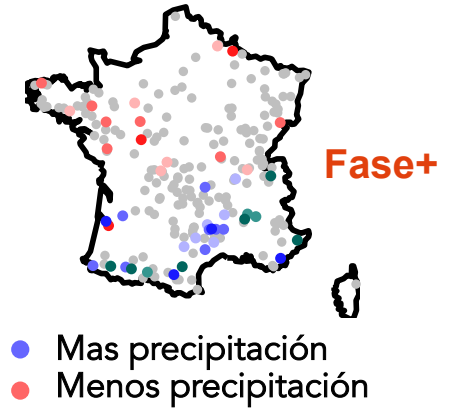


# Ejemplos de procesos de variabilidad interna

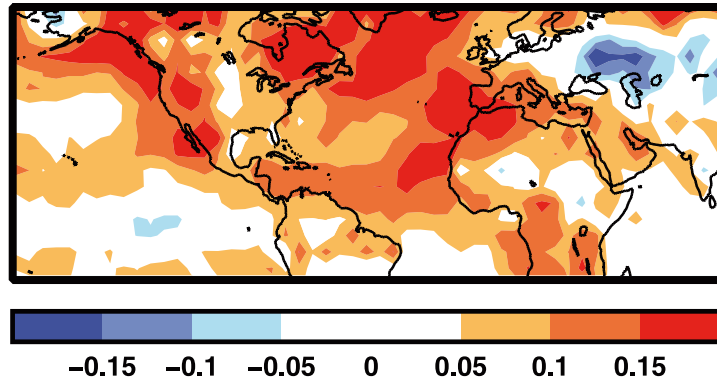
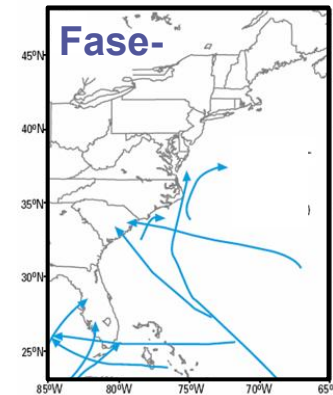
## Variabilidad Multidecadal del Atlántico



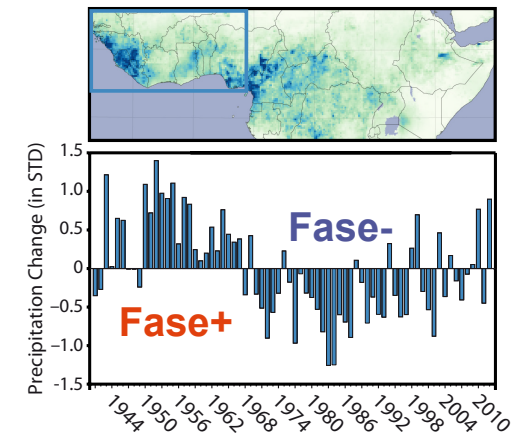
## Intensidad de sequías



## Ocurrencia huracanes



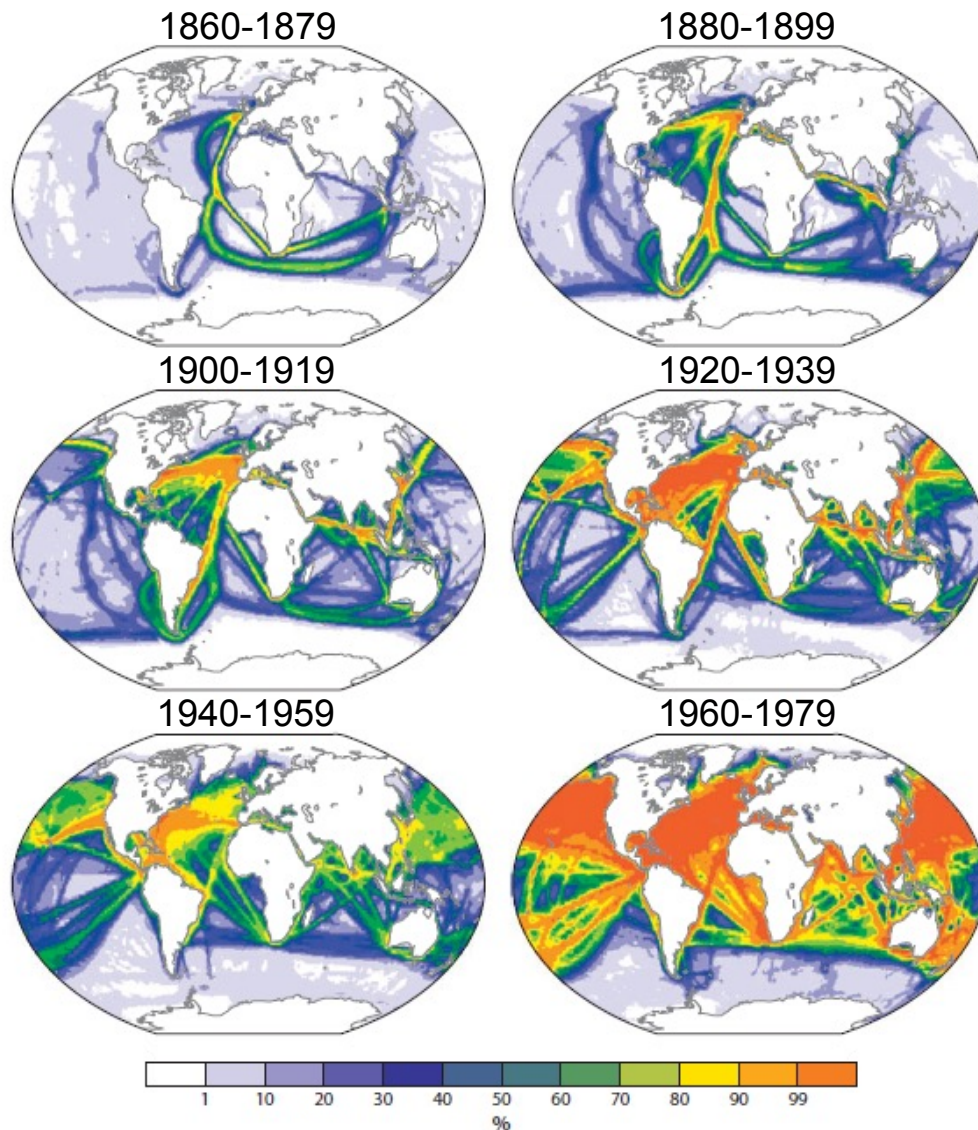
## Precipitaciones en el Sahel



# Limitación

Todo este conocimiento se basa en las observaciones disponibles que en el mejor de los casos llegan hasta principios del siglo XIX

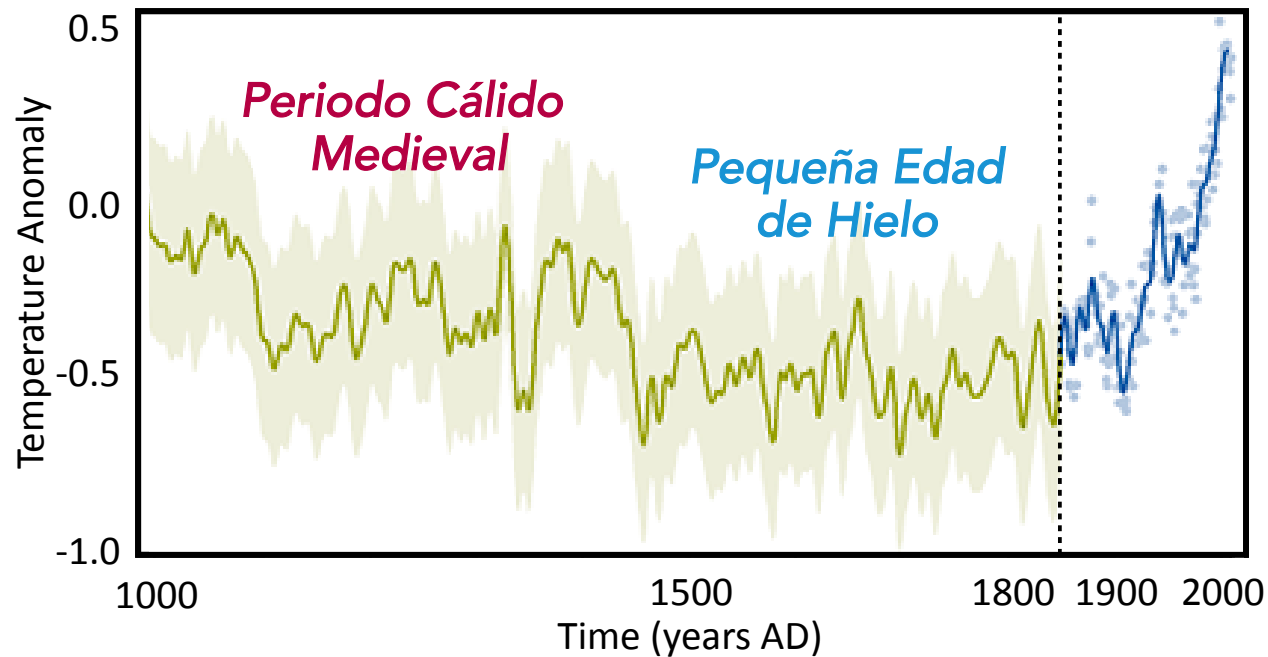
## Observaciones temperatura del océano



**¿Es posible poner los cambios recientes en un contexto climático sin influencias antropogénicas?**

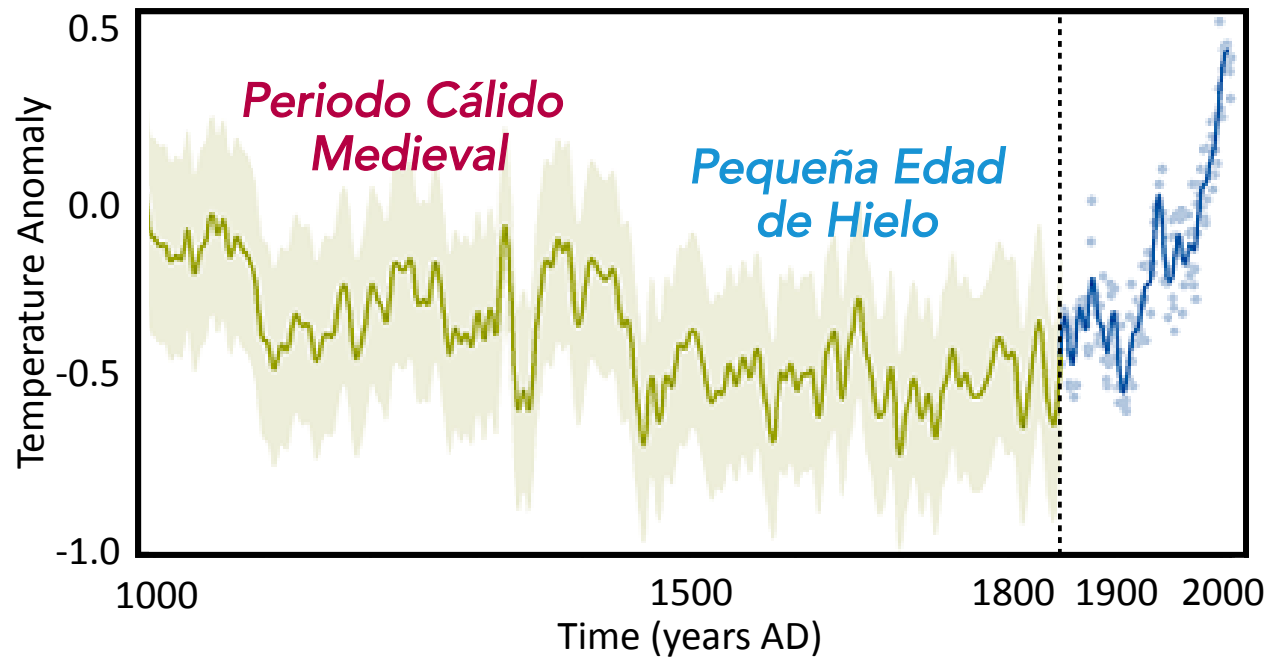
# Paleoclimatología: el estudio del clima pasado

Evolución temperatura del hemisferio norte en los últimos 1000 años



# Paleoclimatología: el estudio del clima pasado

Evolución temperatura del hemisferio norte en los últimos 1000 años



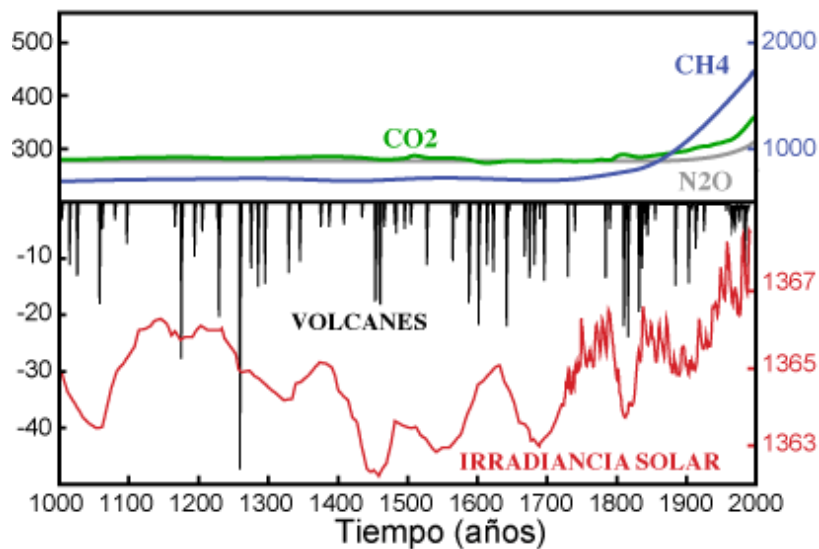
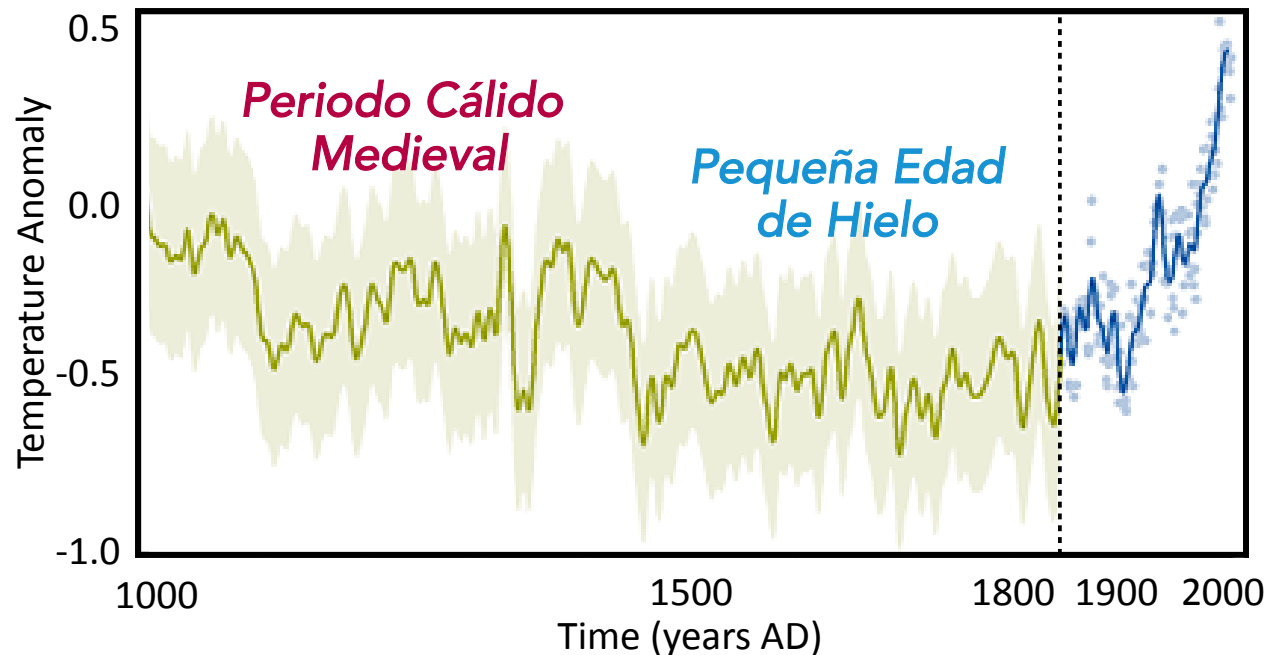
*Feria sobre el Támesis helado*  
(Thomas Wyte, 1683-1684)



*Los cazadores en la nieve*  
(Bruegel el Viejo, 1595)

# Paleoclimatología: el estudio del clima pasado

## Evolución temperatura del hemisferio norte en los últimos 1000 años



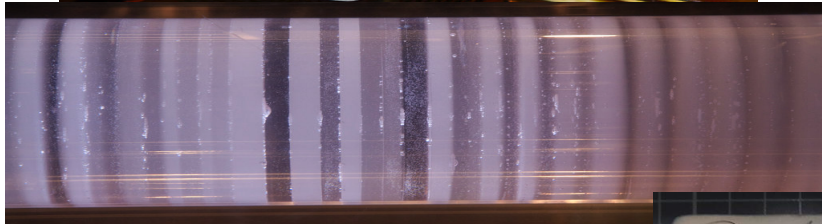
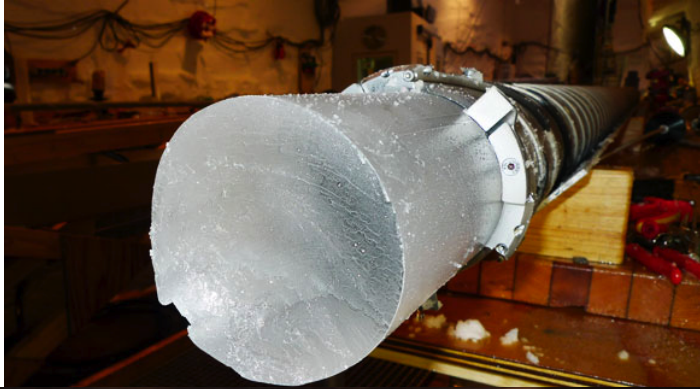
Las variaciones del último milenio responden principalmente a cambios en

**La actividad solar**  
**Las erupciones volcánicas**  
**Los gases de efecto invernadero**

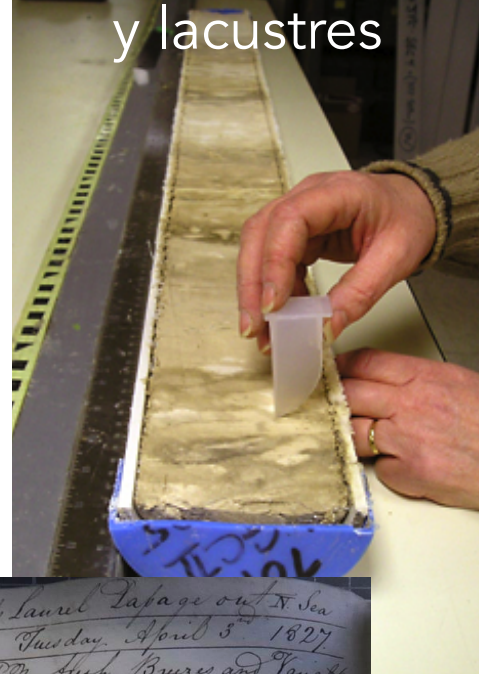


# Paleoclimatología: Archivos naturales

Testigos de hielo



Sedimentos marinos  
y lacustres



Espeleotemas



Anillos de árboles

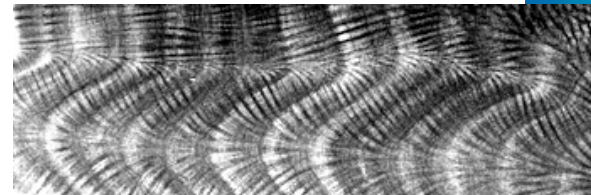


Remarks on Board Ship Laurel Page out N Sea Tuesday, April 5<sup>th</sup> 1827

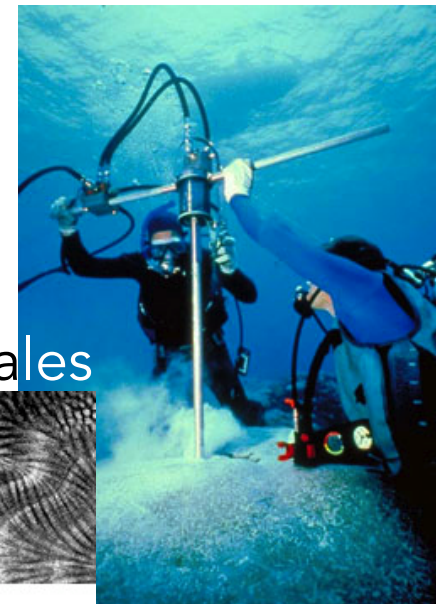
Day	Hour	Compass	Winds	Sea	Remarks
2	7	1 North	West		PM fresh Breeze and Variable with Cloudy Weather.
4	7	"	"	"	at 2 PM strong breeze slowed the Top Gatt. sails. called all Hand and single Reeds the Top sails thick Rainy Weather. at 8 PM light breeze and Variable weather more fair set the Top Gatt. Sails at 4 PM set shrouds Sails on Star board side same ships in Co.
6	5	1 N. E.	W. N. W.		
8	5	"	N. E. N. W.	1	
10		"	Calm		
12		"	"	"	
2		"	"	"	
4		"	"	"	
6	5	1 North	S. W.		
8	6	"	N. E.		
10	6	"	"		
12	7	"	"		Meridian fresh Breeze and Cloudy

Fuentes documentales

Corales



1 cm





# Paleoclimatología: ¿Qué nos cuentan los árboles?

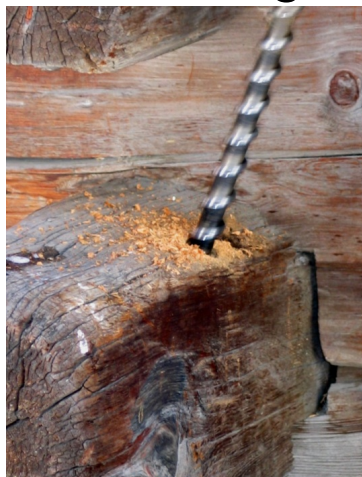


El **crecimiento de los anillos** de los árboles es **sensible a las condiciones climáticas** (temperatura/precipitación) de cada año

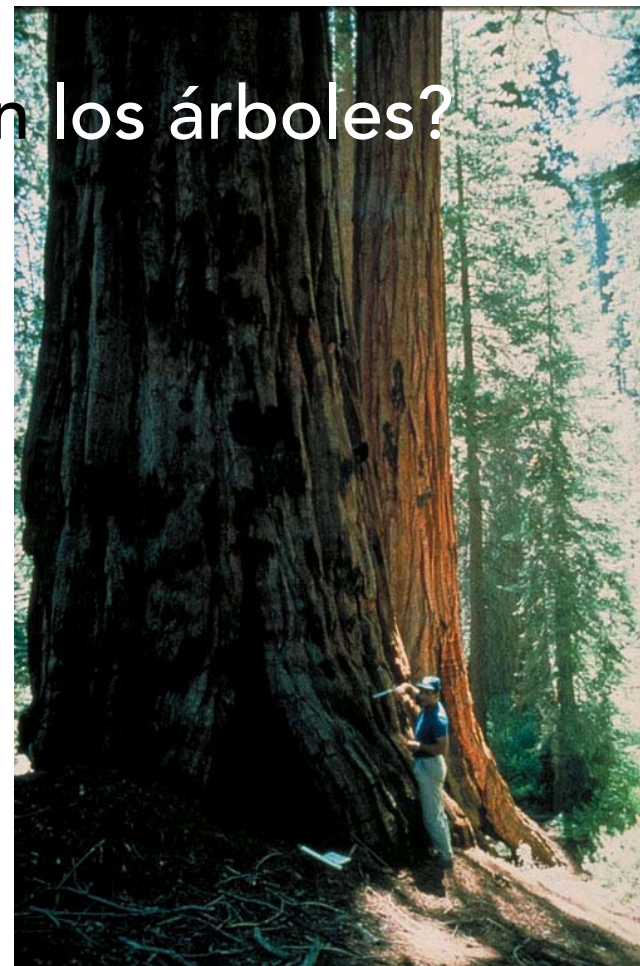
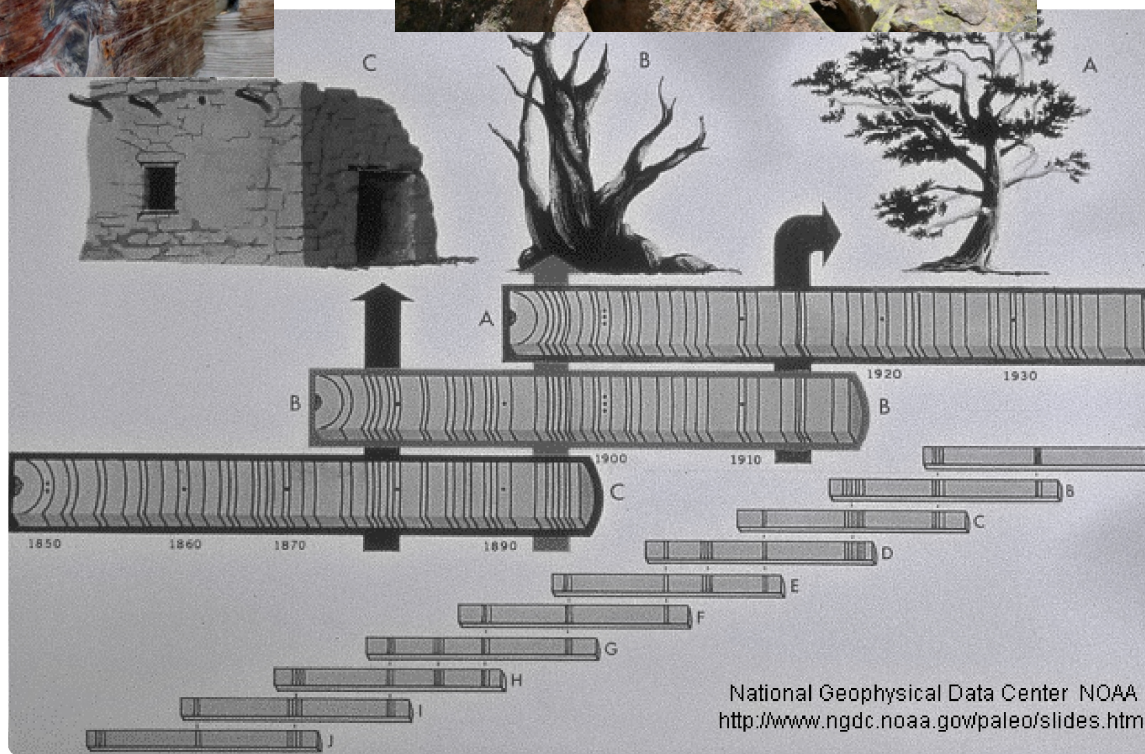


# Paleoclimatología: ¿Qué nos cuentan los árboles?

Edificios antiguos



Árboles muertos



Árboles vivos

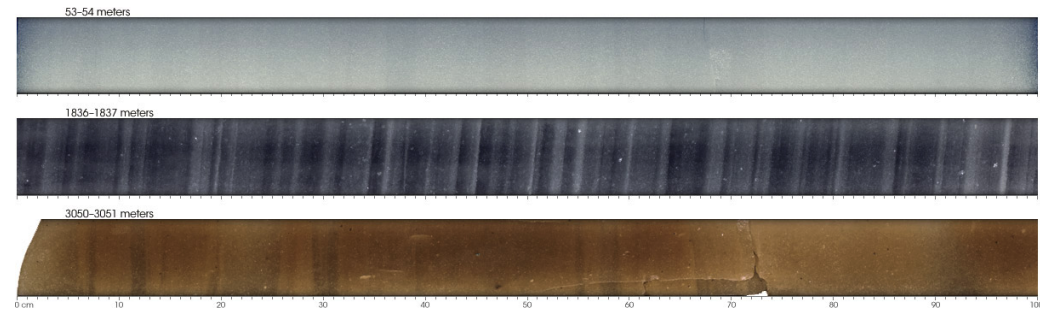
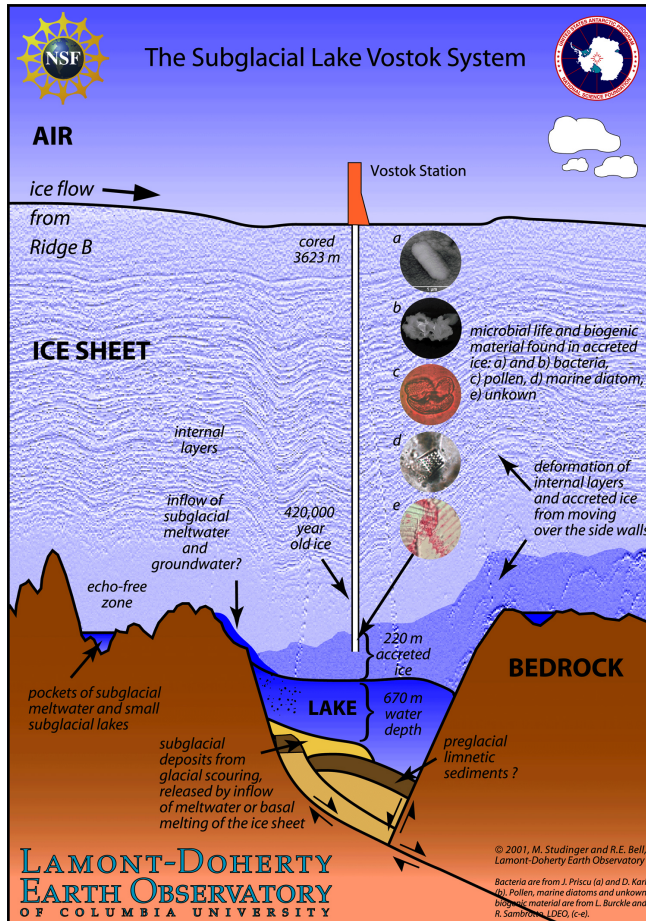


*Combinando información de distintas fuentes podemos reconstruir el clima más allá de los últimos 2000 años*

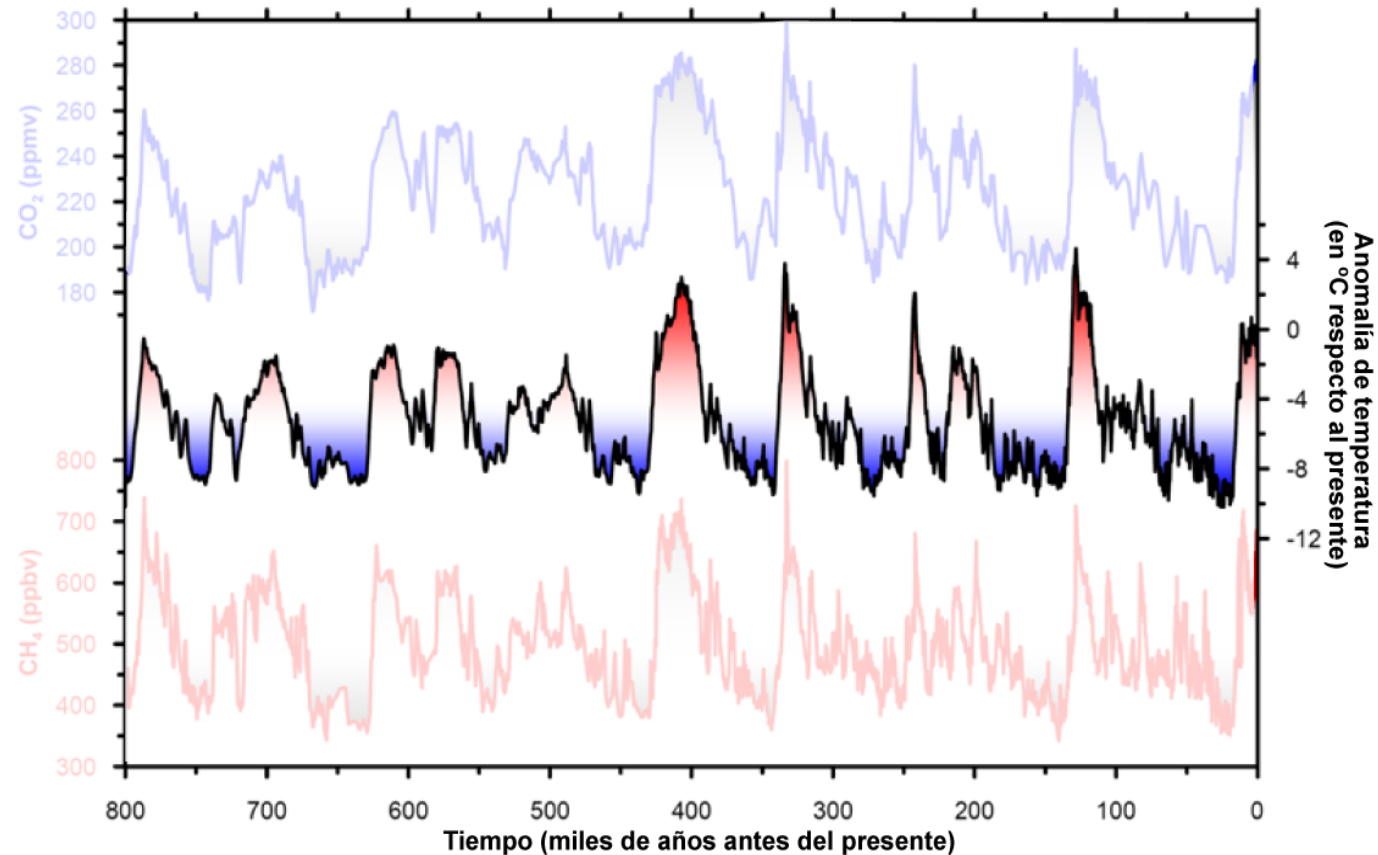


# Paleoclimatología: ¿Y los testigos de hielo?

## Extracción de testigos



## Cambios de temperatura respecto al presente: Antártida



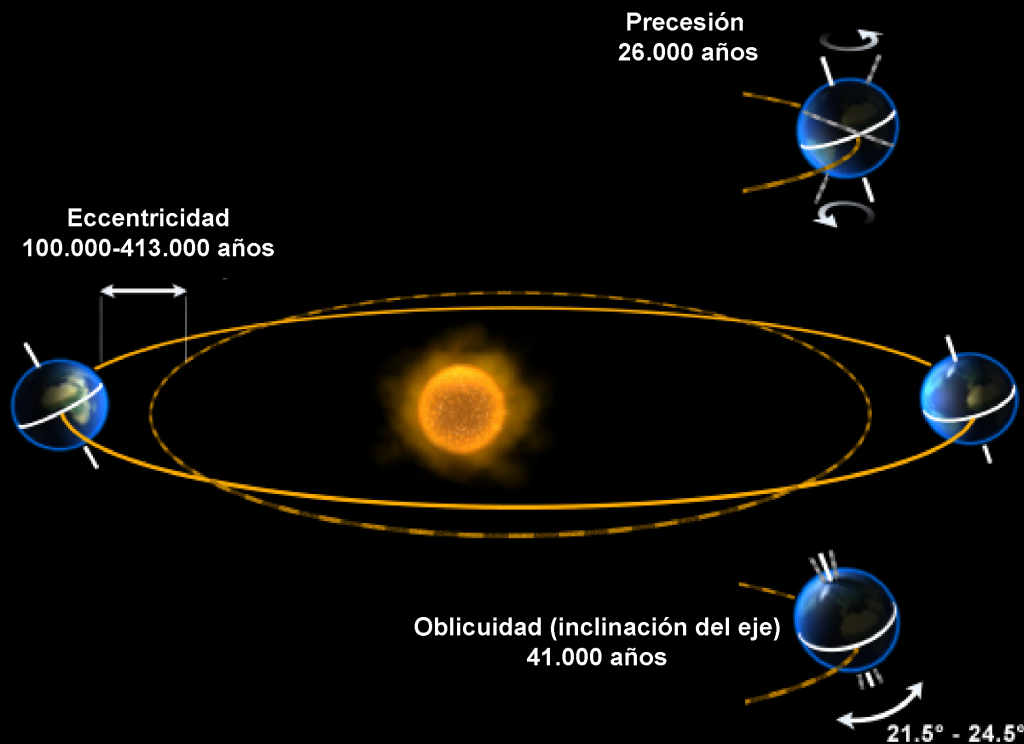
Los últimos 800.000 años muestran 8 periodos glaciales/interglaciales



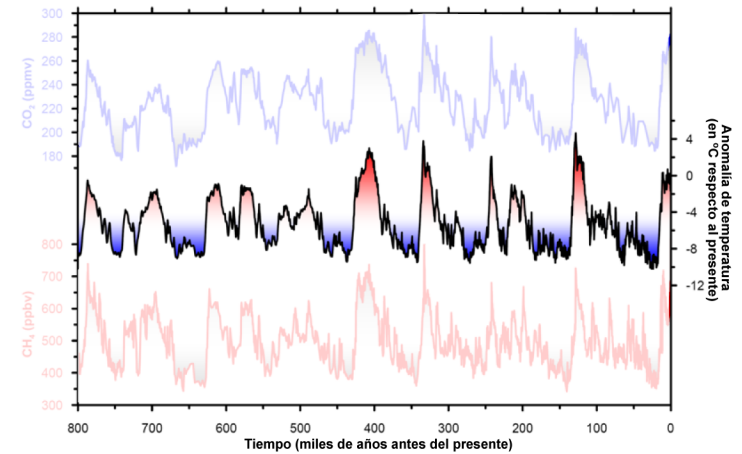
# Paleoclimatología: Causas ciclos glaciares/interglaciares

## Factores externos: parámetros orbitales

### CICLOS DE MILANKOVITCH



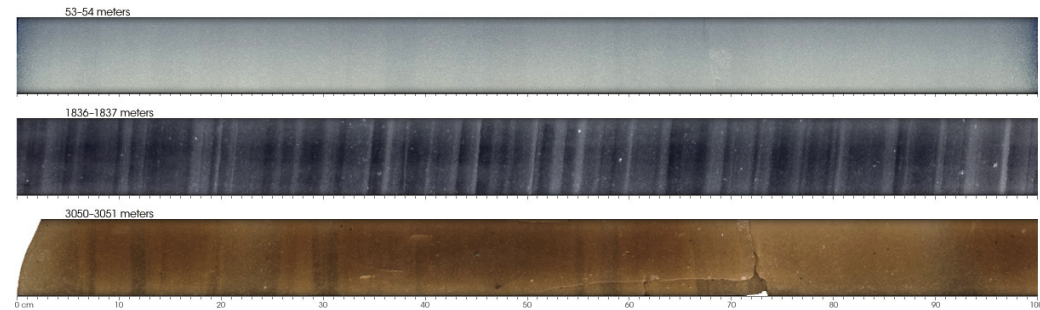
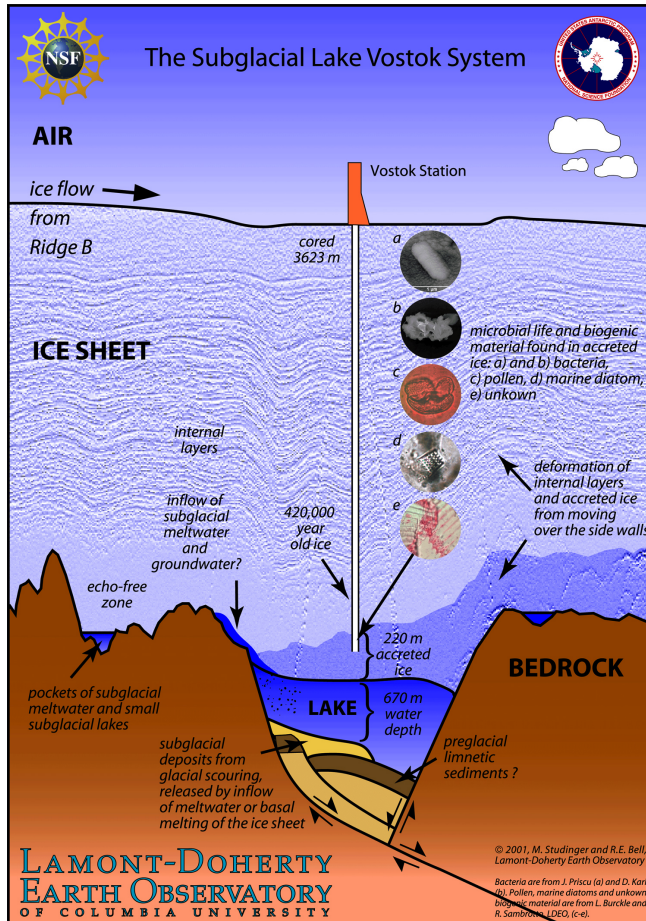
©The COMET Program



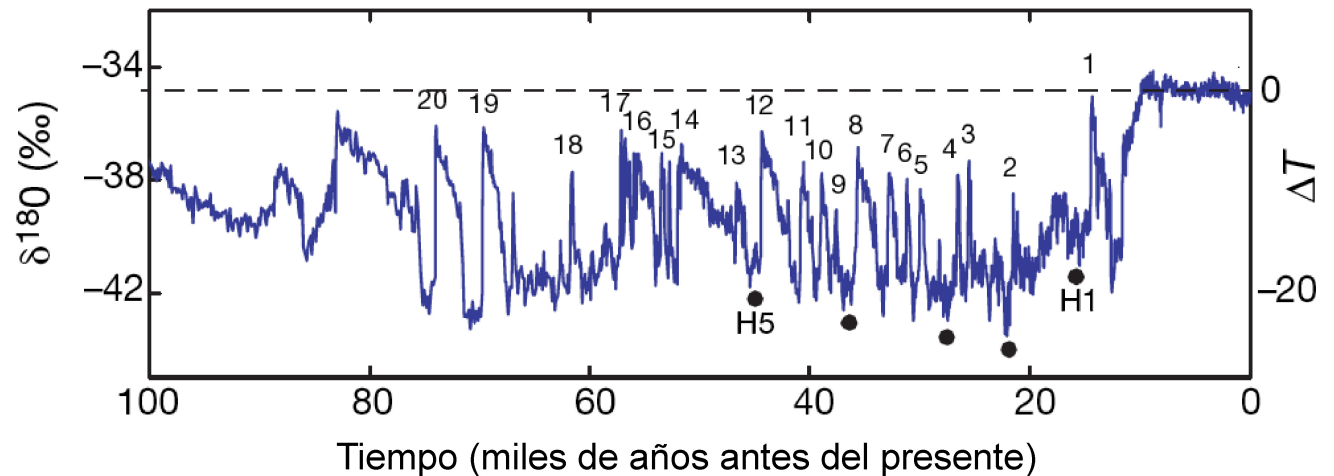
Los últimos 4 interglaciares duraron ~20.000 años (Holoceno lleva ~12.000 años)

# Paleoclimatología: ¿Y los testigos de hielo?

## Extracción de testigos



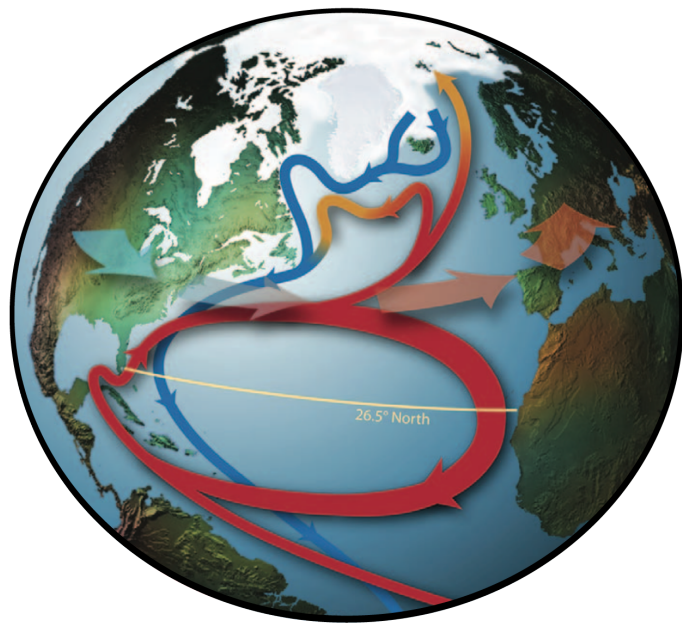
## Cambios de temperatura respecto al presente: Groenlandia



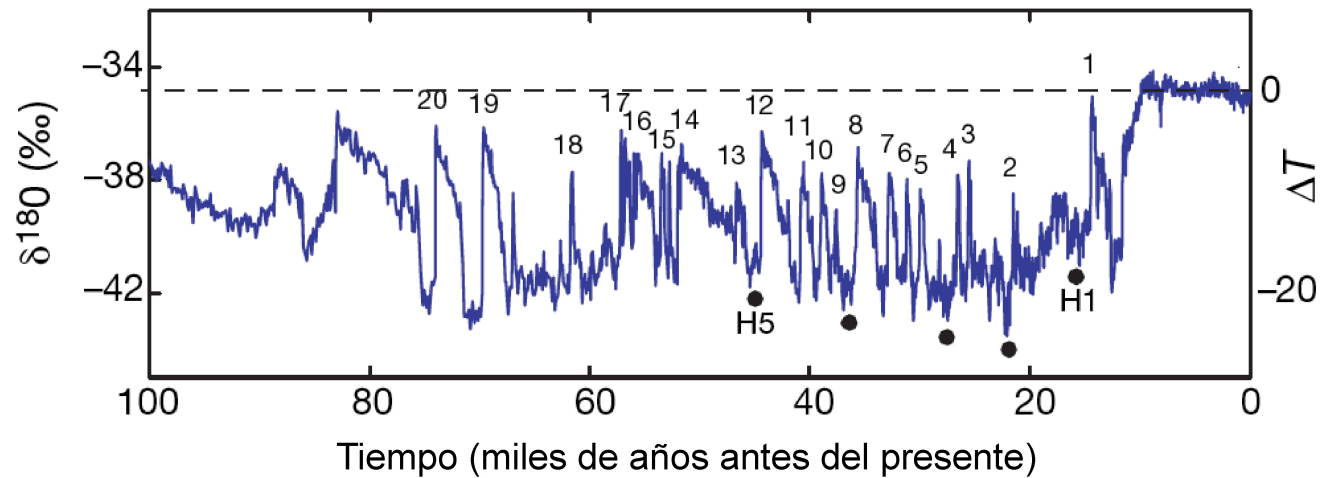
El **holoceno** (el interglacial actual) es un periodo **muy estable** comparado con la **última era glacial**, que mostró **cambios en temperatura de hasta 15°C**

# Paleoclimatología: Causas de cambios en Groenlandia

**Factor interno:**  
la circulación oceánica



**Cambios de temperatura respecto al presente: Groenlandia**

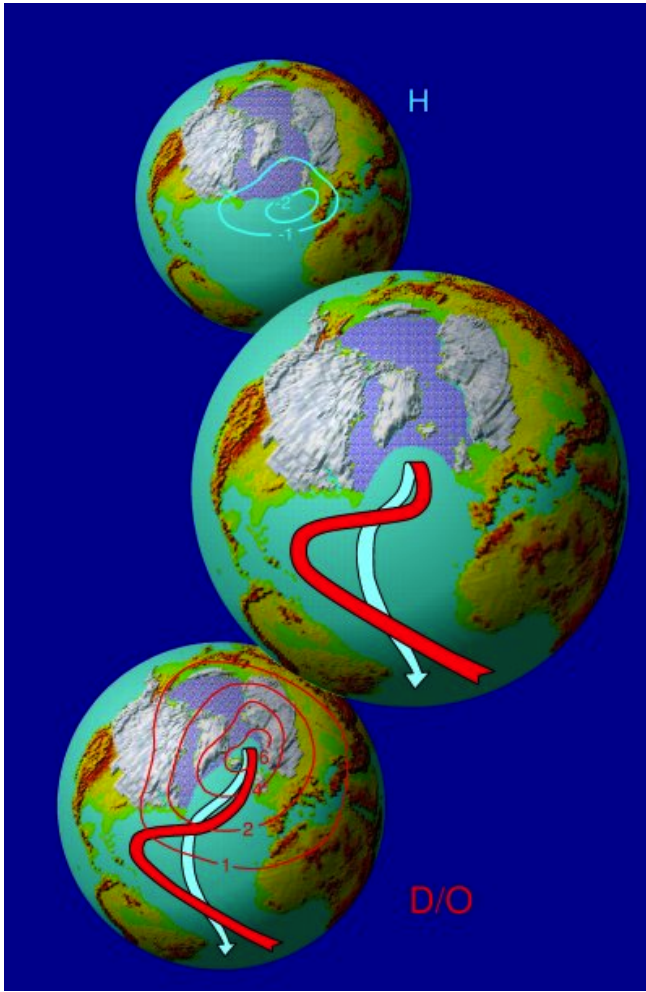


- ➡ Corrientes cálidas y salinas
- ➡ Corrientes frías y profundas

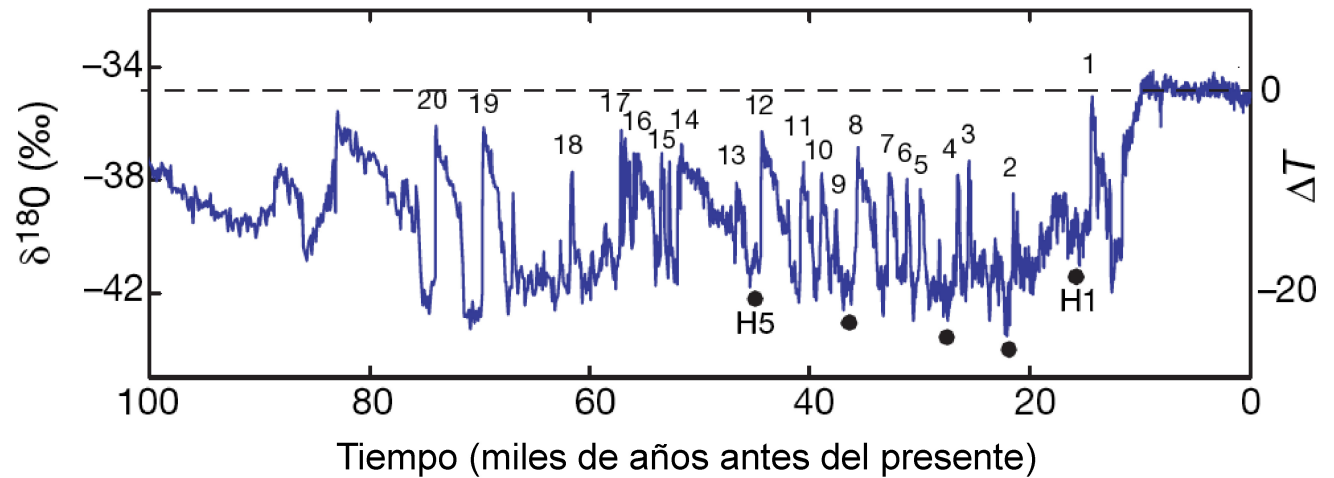
La circulación oceánica puede producir **cambios abruptos en el clima**

# Paleoclimatología: Causas de cambios en Groenlandia

Cambios de la circulación oceánica en la era glacial



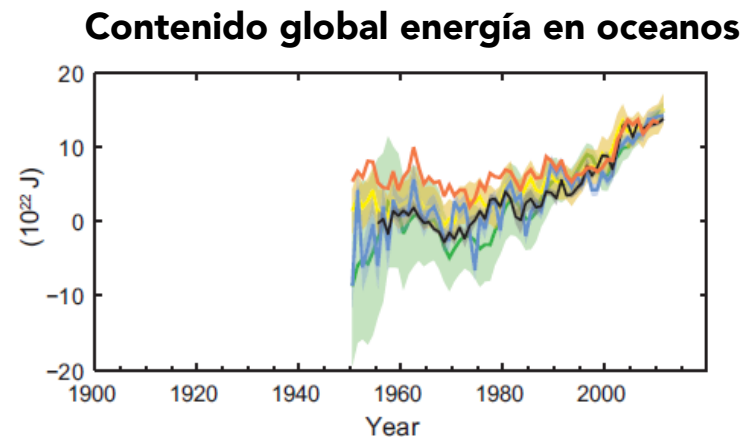
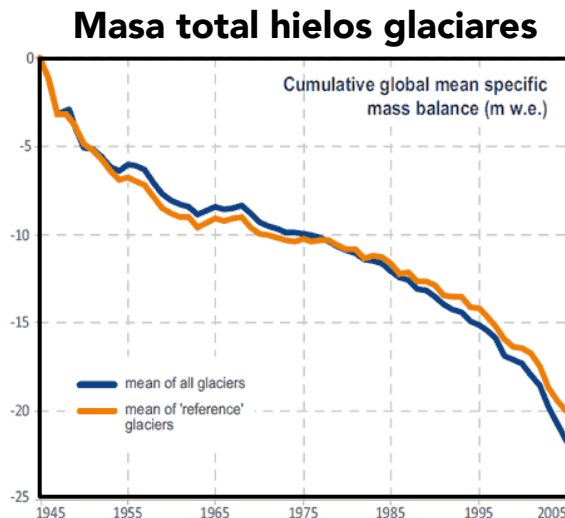
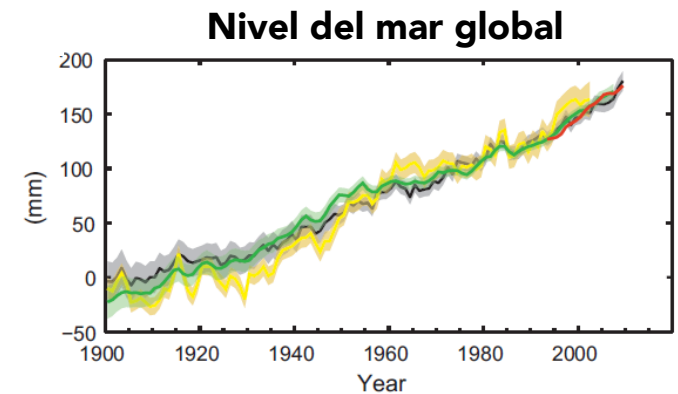
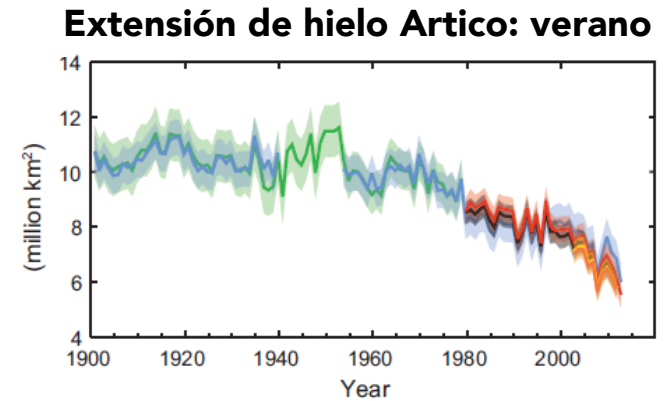
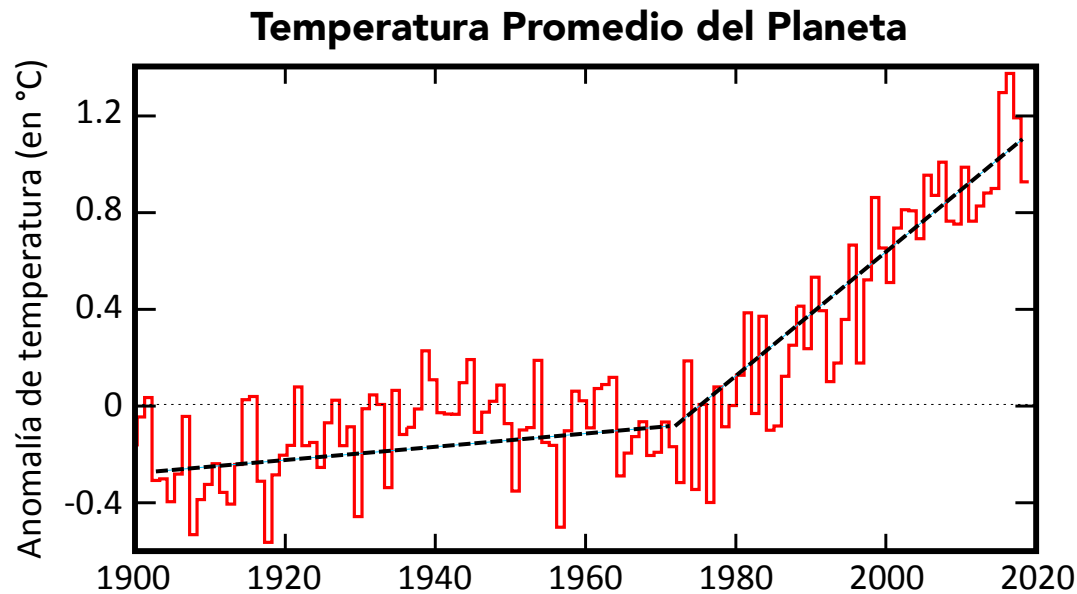
Cambios de temperatura respecto al presente: **Groenlandia**



La circulación oceánica puede producir **cambios abruptos en el clima**



# Clima Presente: Atribución cambios recientes

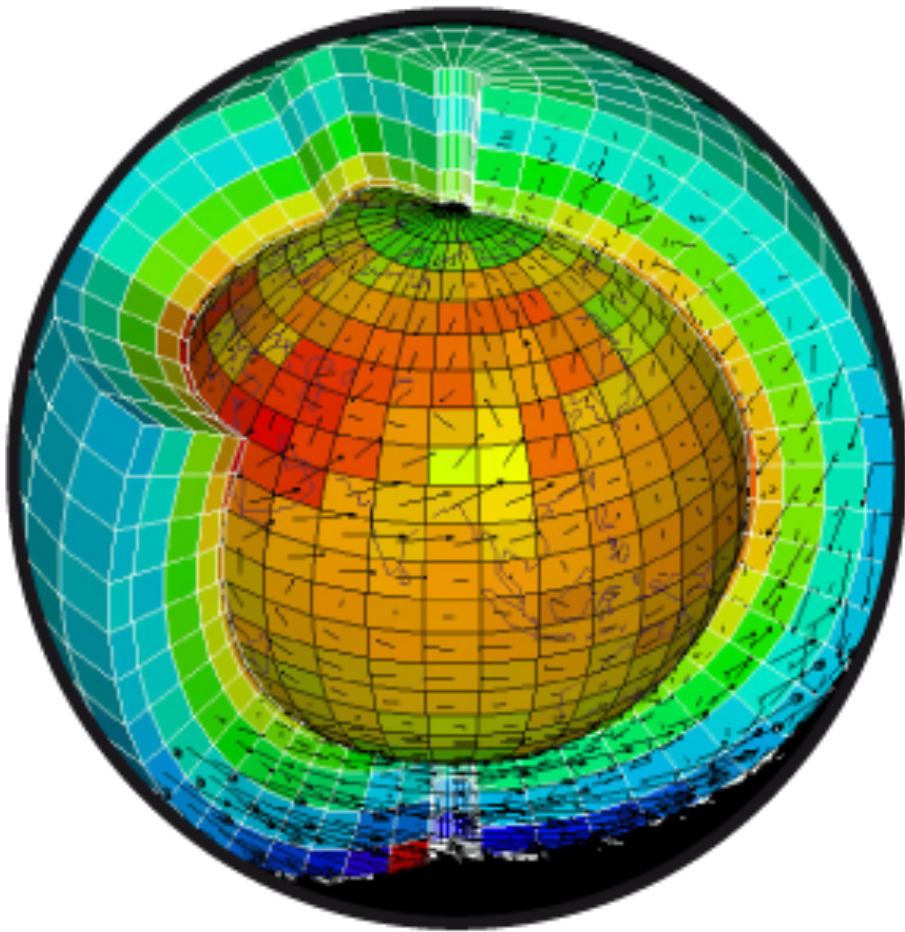


¿Son estos cambios debido a causas naturales? ¿O factores antropogénicos?

# Clima Presente: Método científico

## El método científico: Observación, análisis y ¿experimentación?

*Los modelos climáticos son nuestra herramienta para experimentar con el sistema climático y poner a prueba nuestras hipótesis*



### ECUACIONES DE LA DINÁMICA ATMOSFÉRICA

#### Conservación del momento

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} - \frac{1}{\rho} \nabla p - \vec{g} - 2\vec{\Omega} \times \vec{V} + \nabla \cdot (k_m \nabla \vec{V}) - \vec{F}_d$$

#### Conservación de la energía

$$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} = -\rho c_v (\vec{V} \cdot \nabla) T - \nabla \cdot \vec{R} + \nabla \cdot (k_r \nabla T) + C + S$$

#### Conservación de la masa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -(\vec{V} \cdot \nabla) \rho - \rho (\nabla \cdot \vec{V})$$

#### Conservación del agua en todas sus formas

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -(\vec{V} \cdot \nabla) q + \nabla \cdot (k_q \nabla q) + S_q + E$$

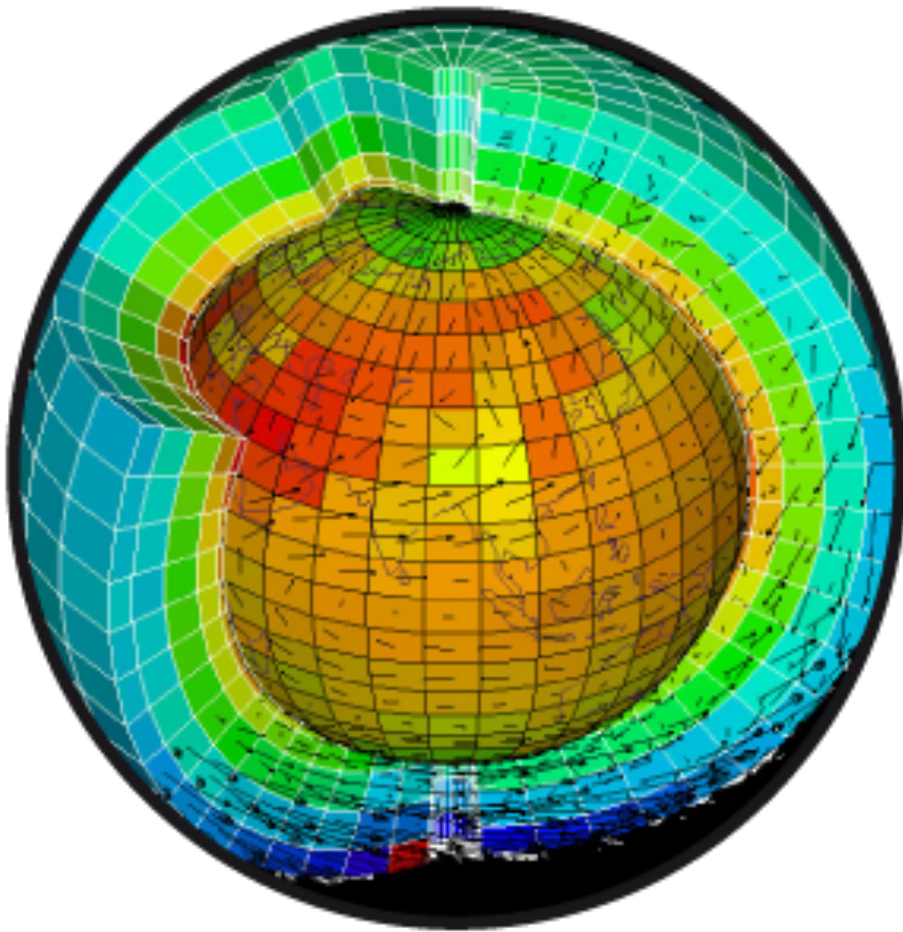
#### Ecuación de estado

$$p = \rho R_d T$$

# Clima Presente: Método científico

## El método científico: Observación, análisis y ¿experimentación?

*Los modelos climáticos son nuestra herramienta para experimentar con el sistema climático y poner a prueba nuestras hipótesis*



### ECUACIONES DE LA DINÁMICA ATMOSFÉRICA

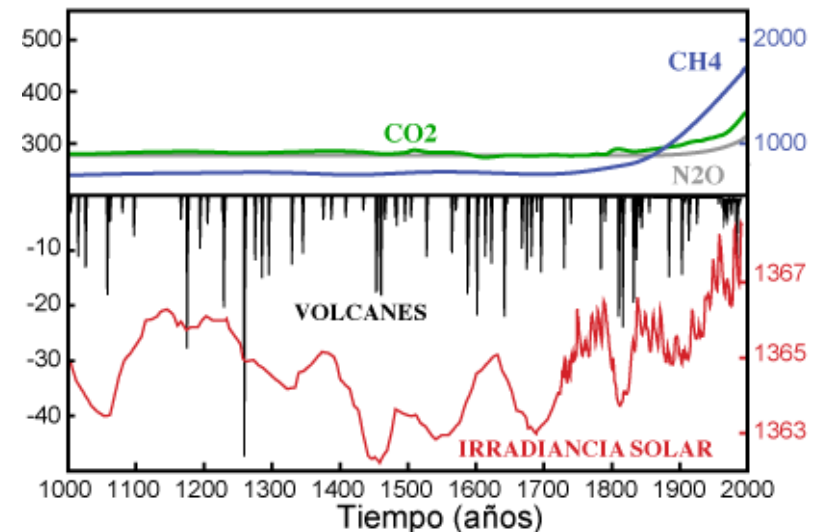
#### Conservación del momento

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} - \frac{1}{\rho} \nabla p - \vec{g} - 2\vec{\Omega} \times \vec{V} + \nabla \cdot (k \nabla \vec{V}) - \vec{F}_d$$

#### Conservación de la energía

$$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} = -\rho c_v (\vec{V} \cdot \nabla) T - \nabla \cdot \vec{R} + \nabla \cdot (k_r \nabla T) + C + S$$

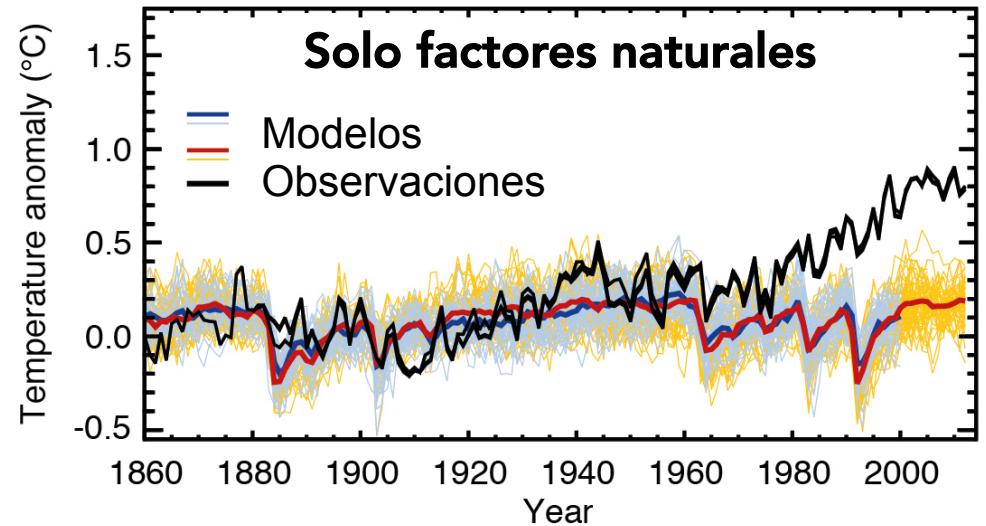
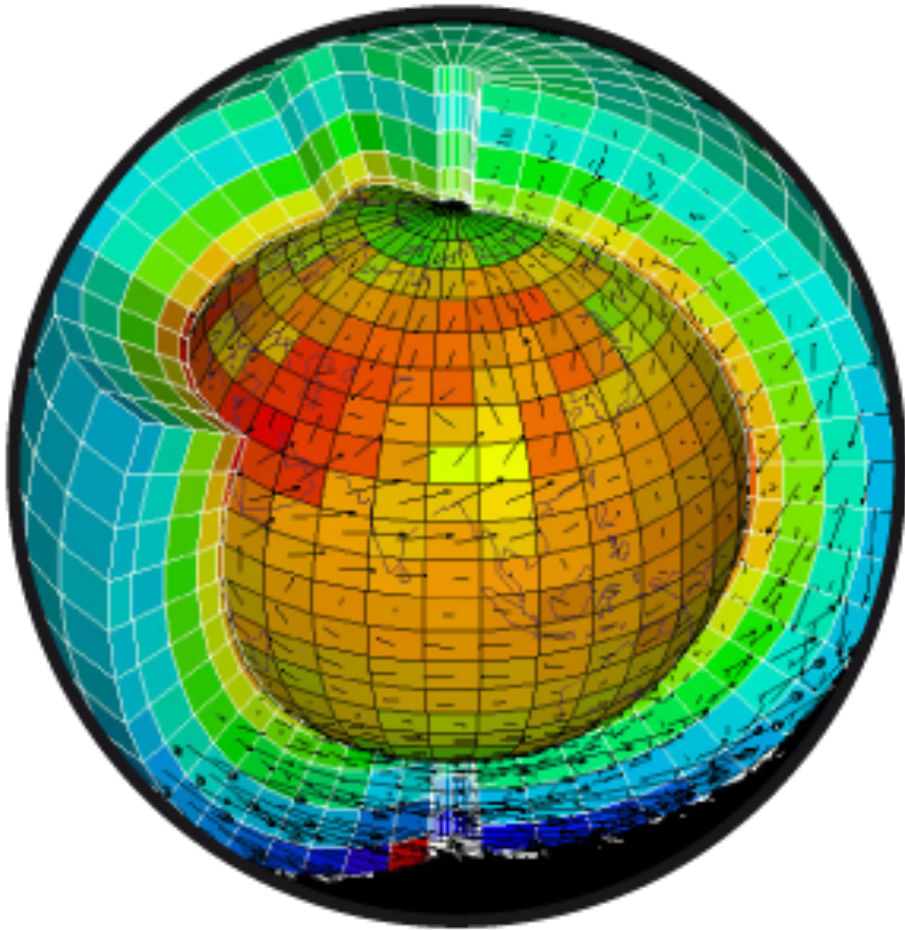
#### Factores Externos





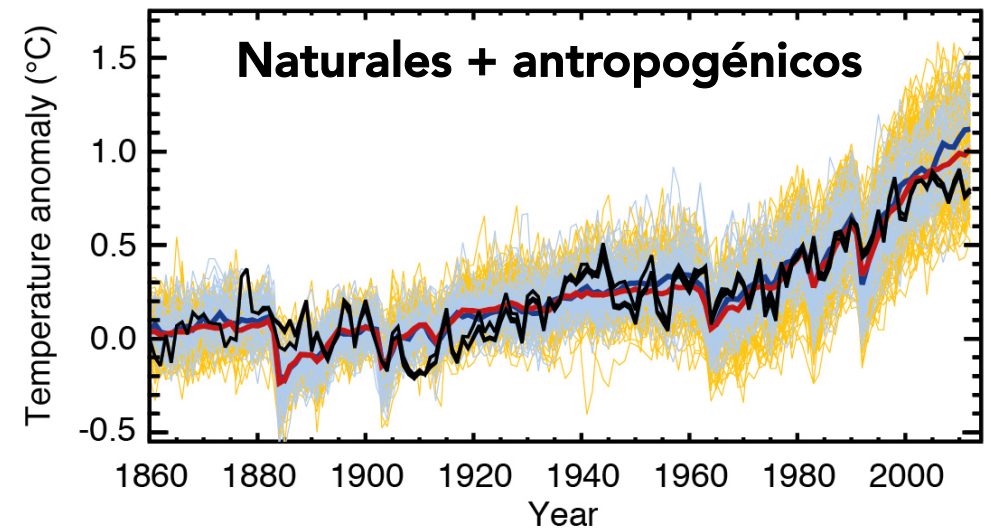
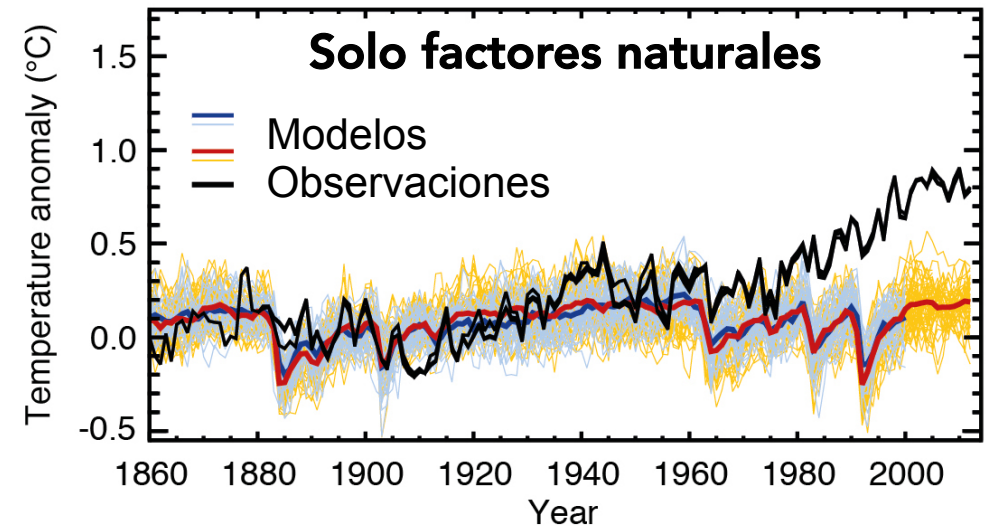
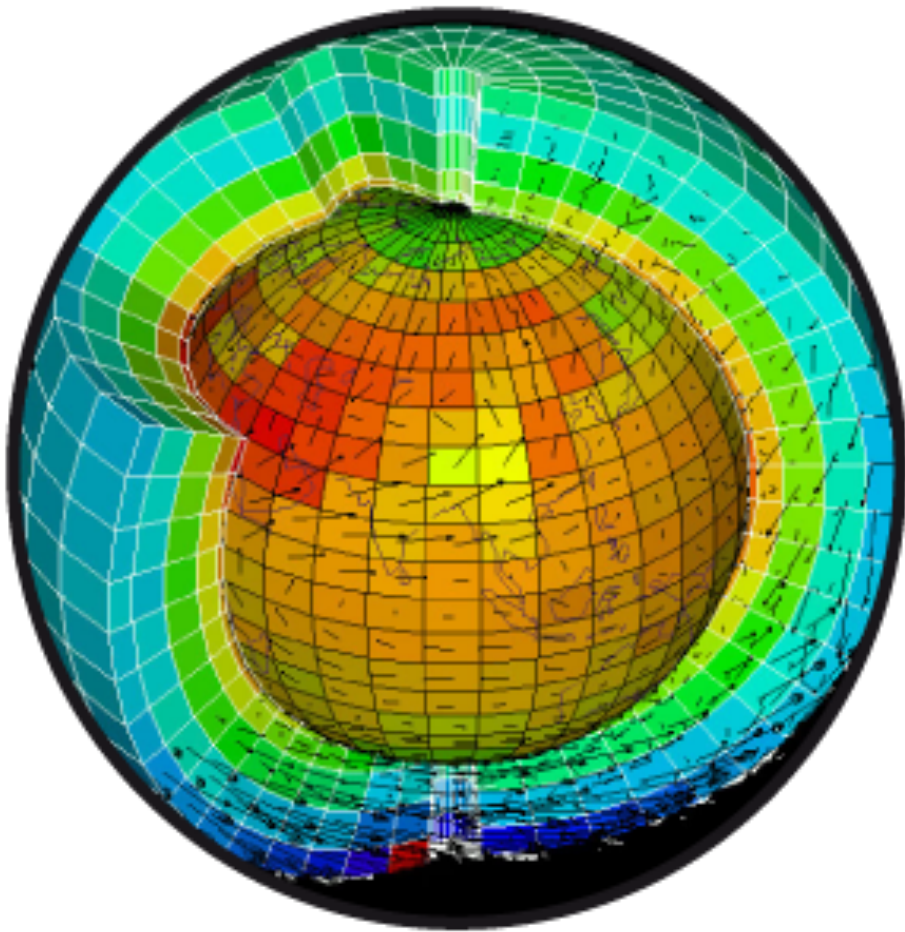
# Clima Presente: Método científico

El calentamiento global se debe a los factores antropogénicos



# Clima Presente: Método científico

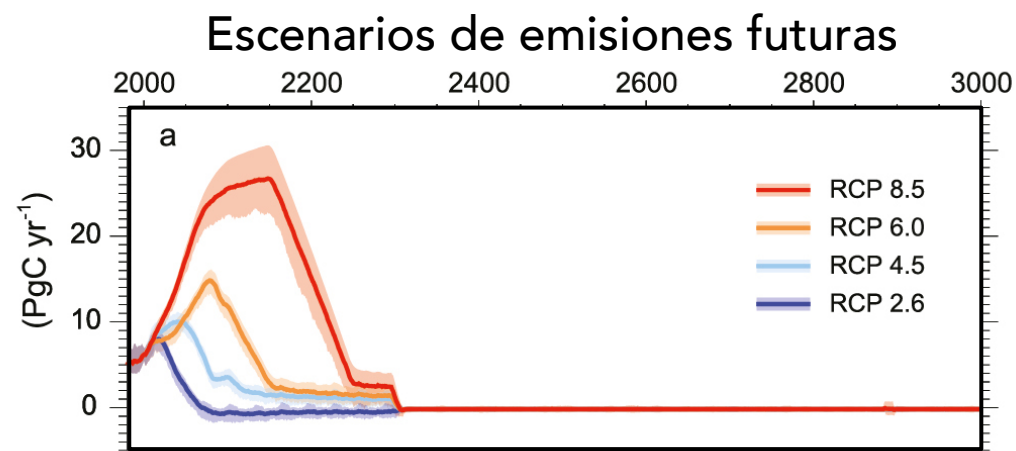
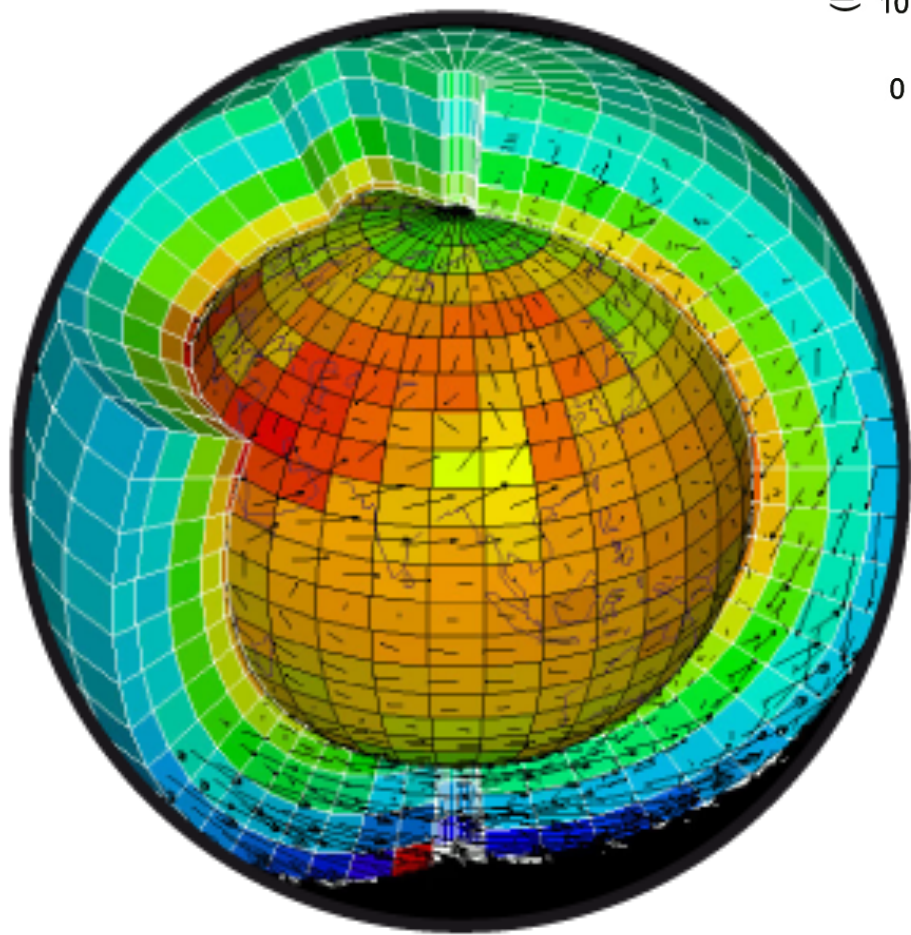
El calentamiento global se debe a los factores antropogénicos



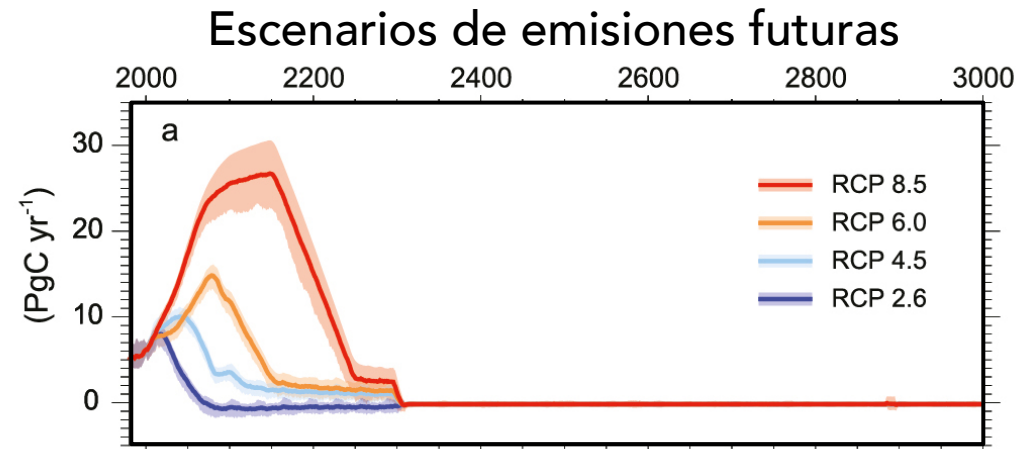
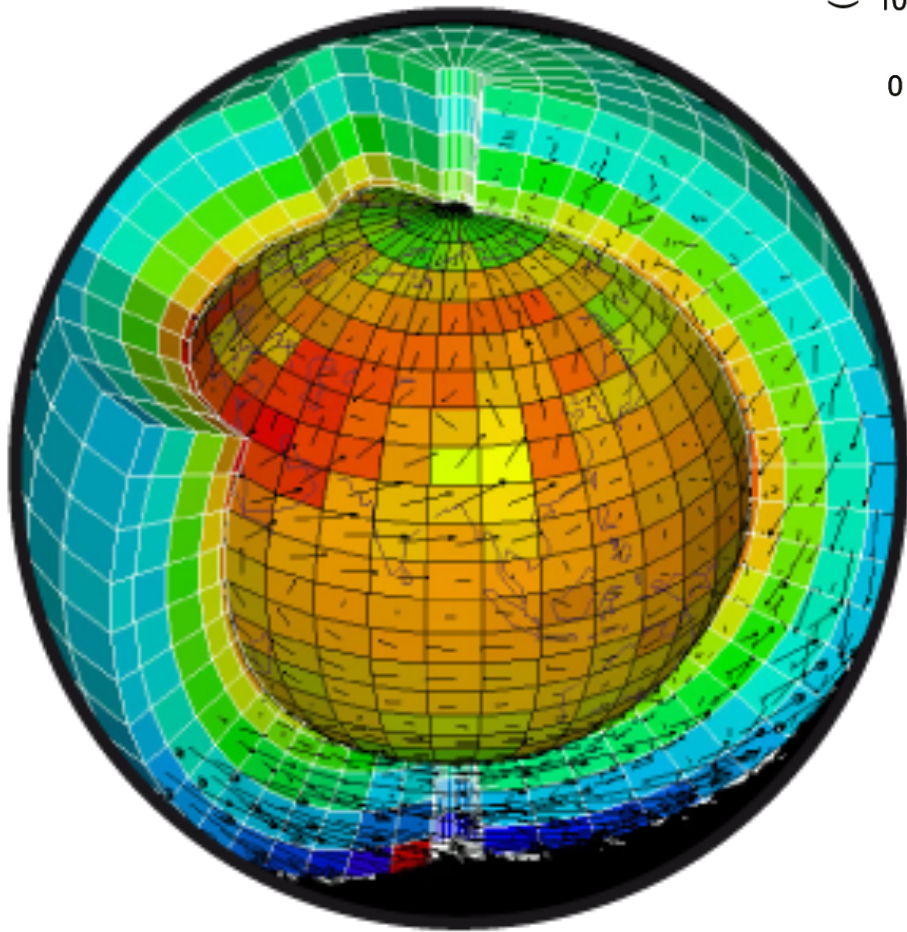
¿Y qué podemos aprender sobre el futuro?



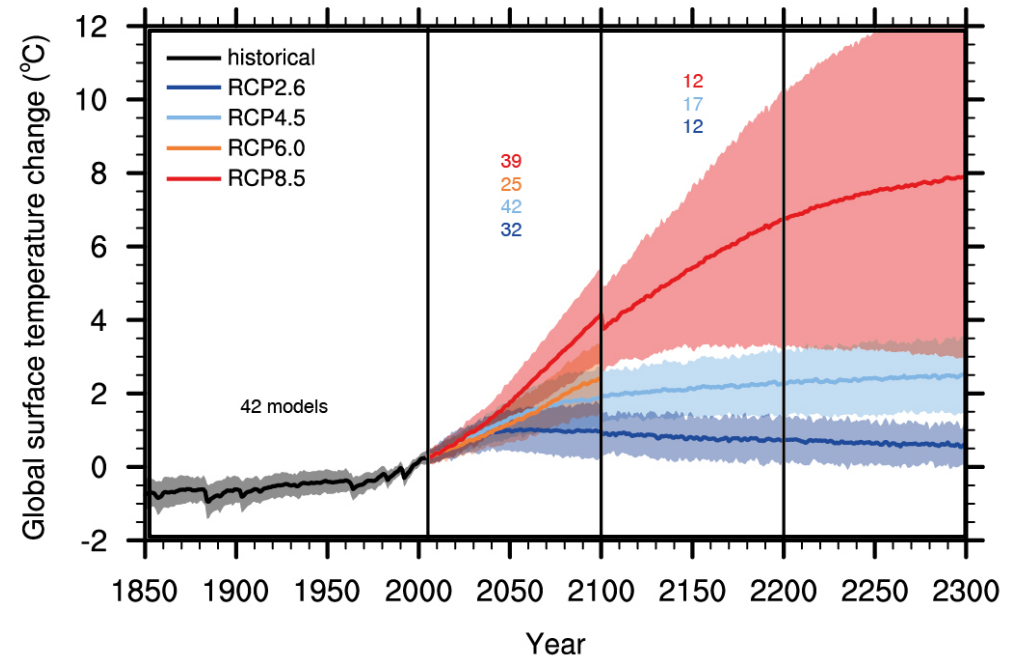
# Clima Futuro: ¿Qué nos dicen los modelos?



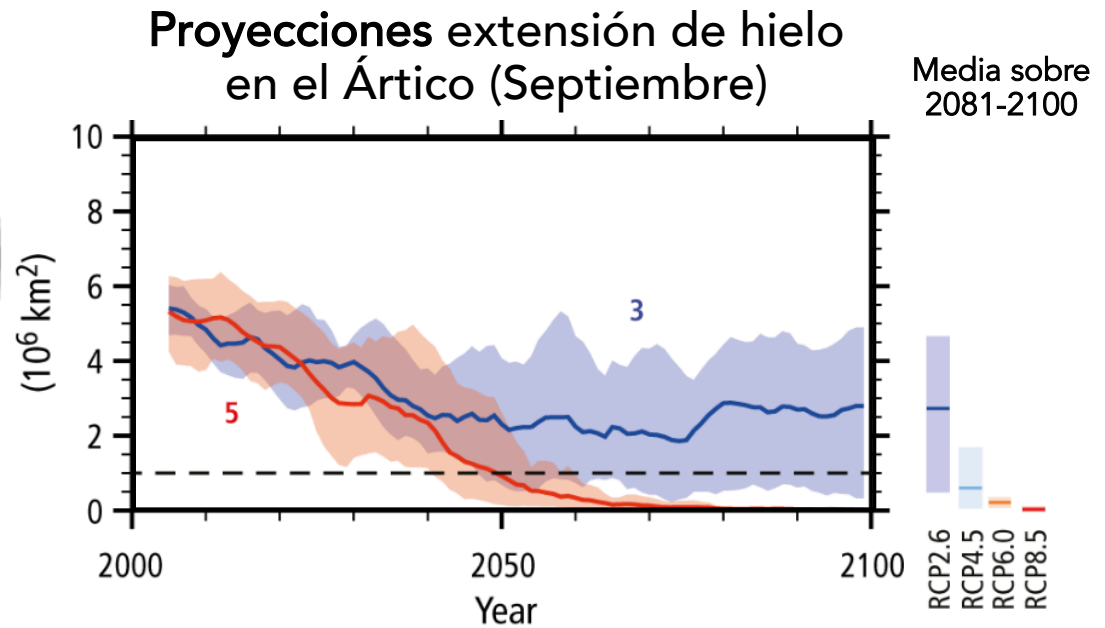
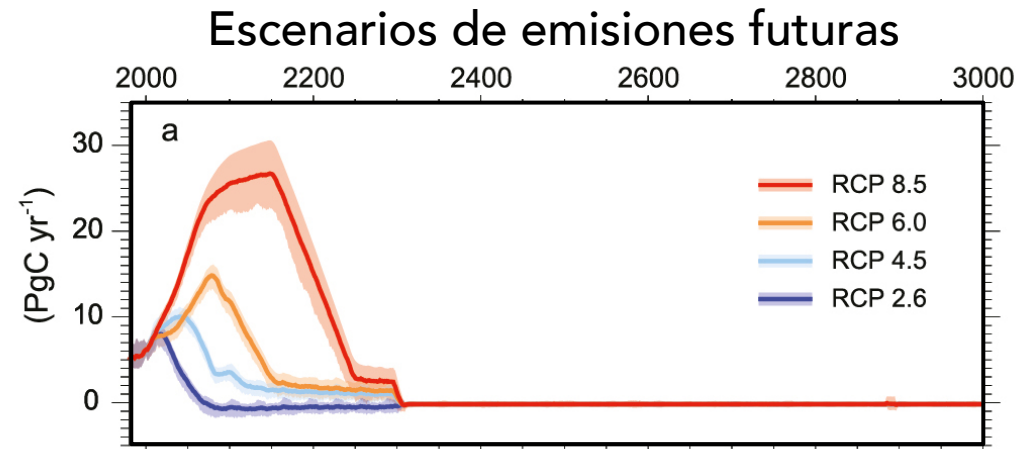
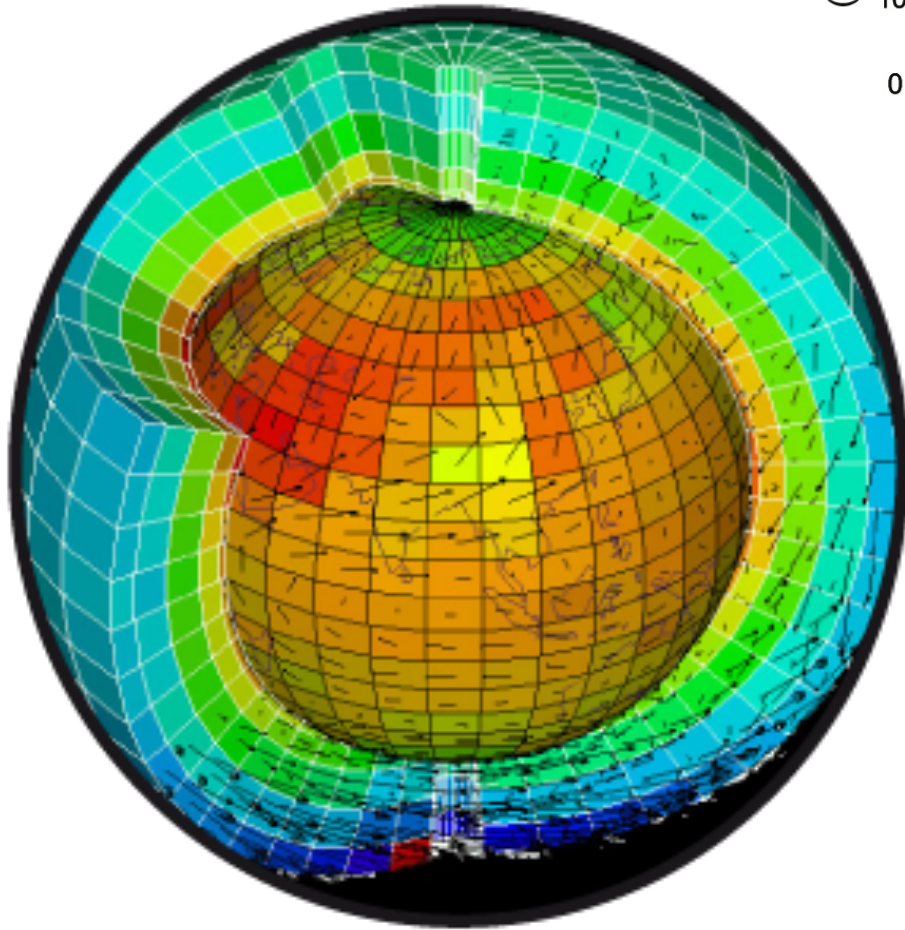
# Clima Futuro: ¿Qué nos dicen los modelos?



## Proyecciones de la temperatura media global

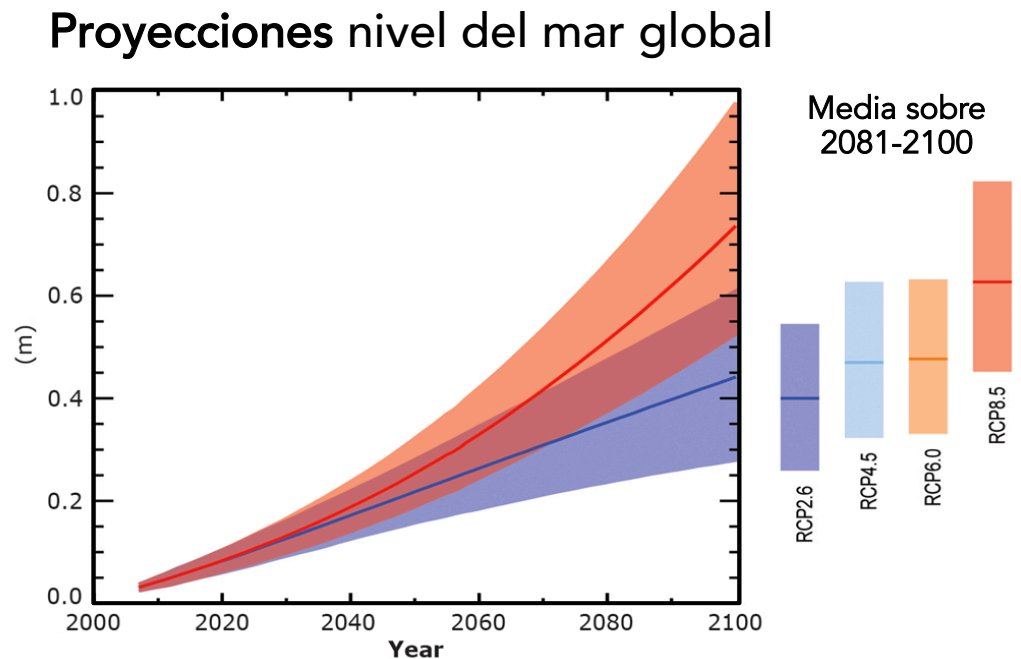
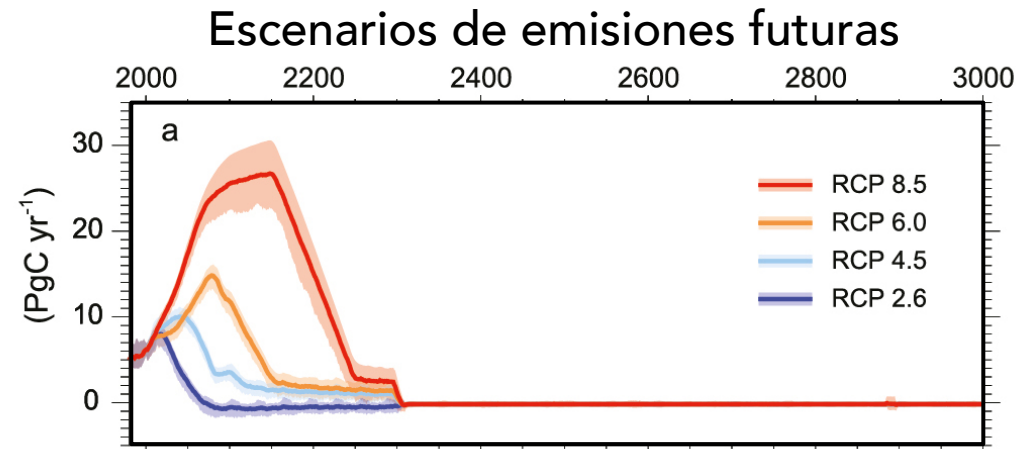
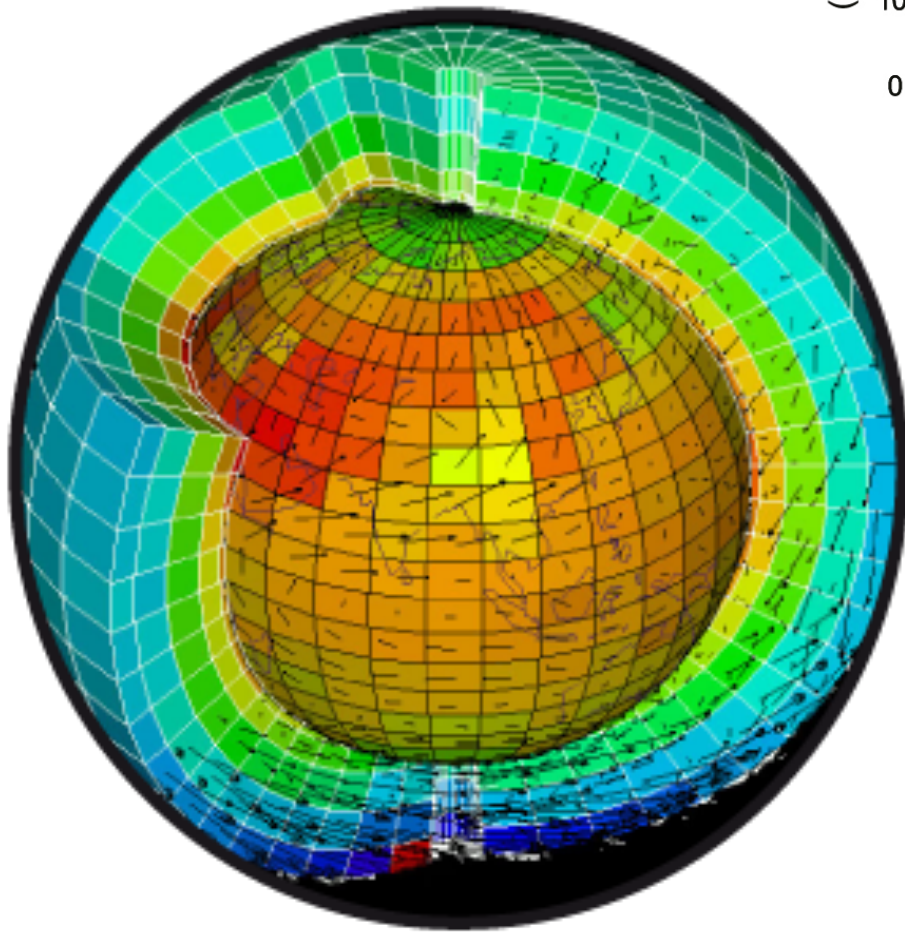


# Clima Futuro: ¿Qué nos dicen los modelos?





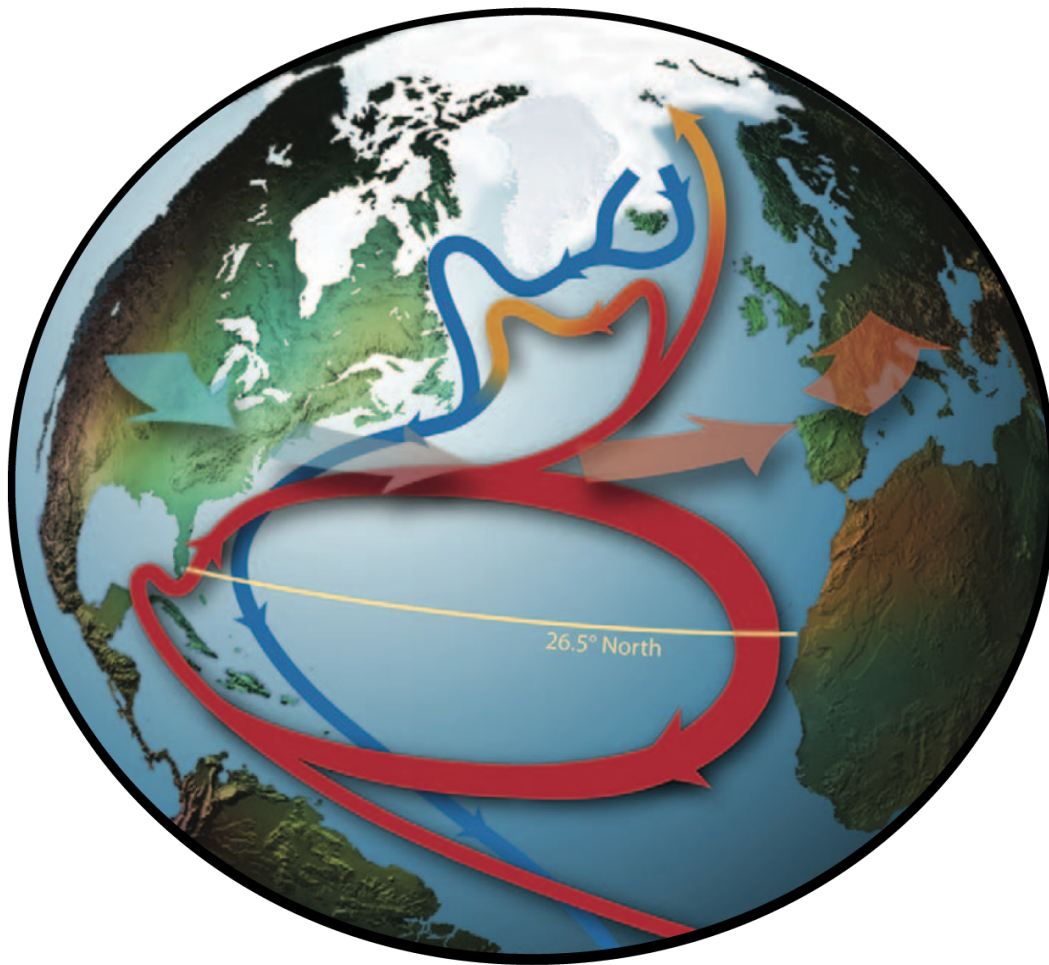
# Clima Futuro: ¿Qué nos dicen los modelos?





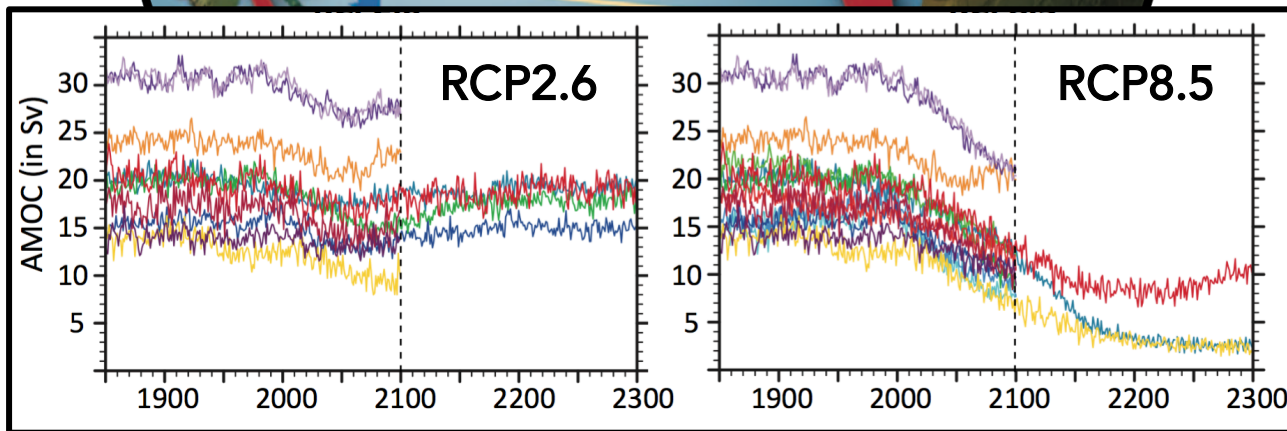
# Clima Futuro: Incógnitas

¿Qué pasará con la circulación oceánica? ¿Es posible que se colapse?  
¿Con qué consecuencias?



# Clima Futuro: Incógnitas

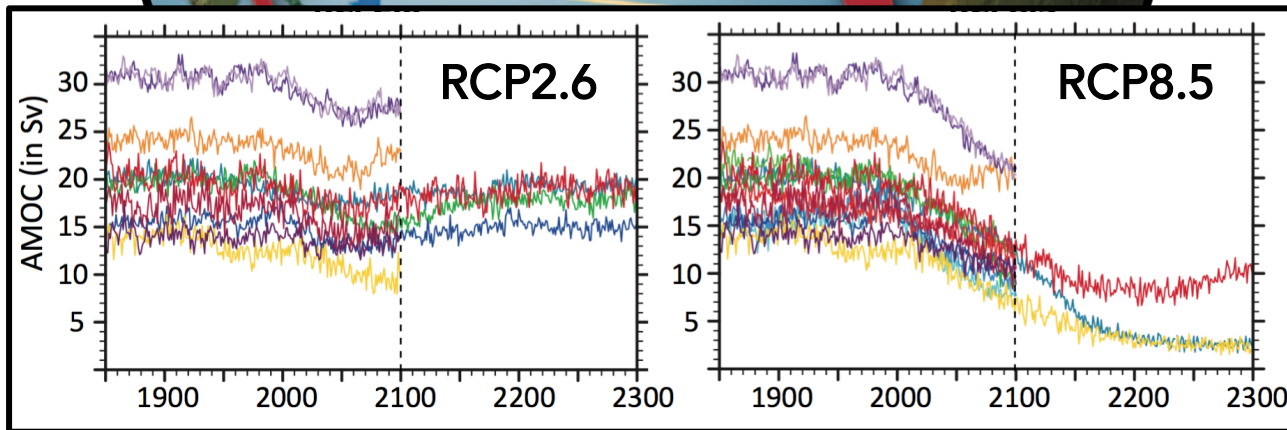
¿Qué pasará con la circulación oceánica? ¿Es posible que se colapse?  
¿Con qué consecuencias?



Por ahora **ningún modelo sugiere un colapso total**, pero hay procesos importantes que podrían no estar bien representados en los modelos

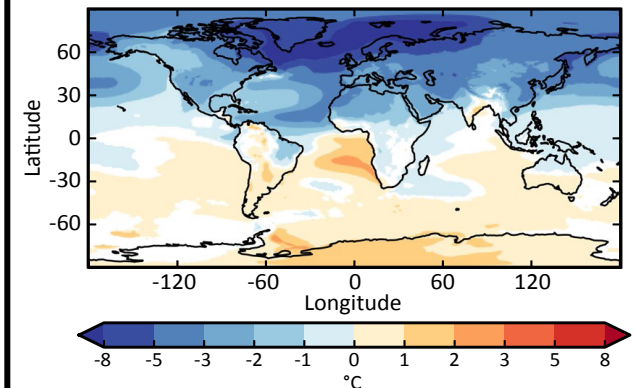
# Clima Futuro: Incógnitas

¿Qué pasará con la circulación oceánica? ¿Es posible que se colapse?  
¿Con qué consecuencias?

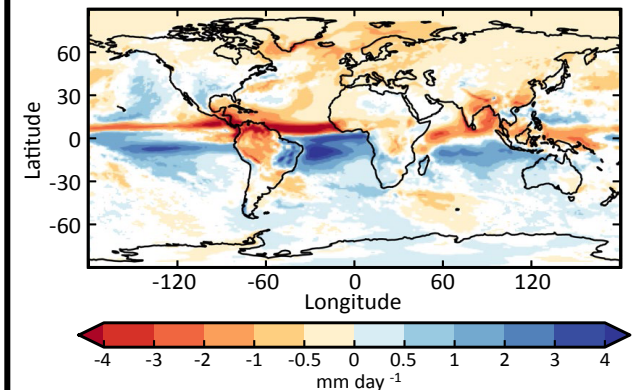


## Impactos climáticos de un colapso de la circulación

Temperatura en superficie



Precipitación



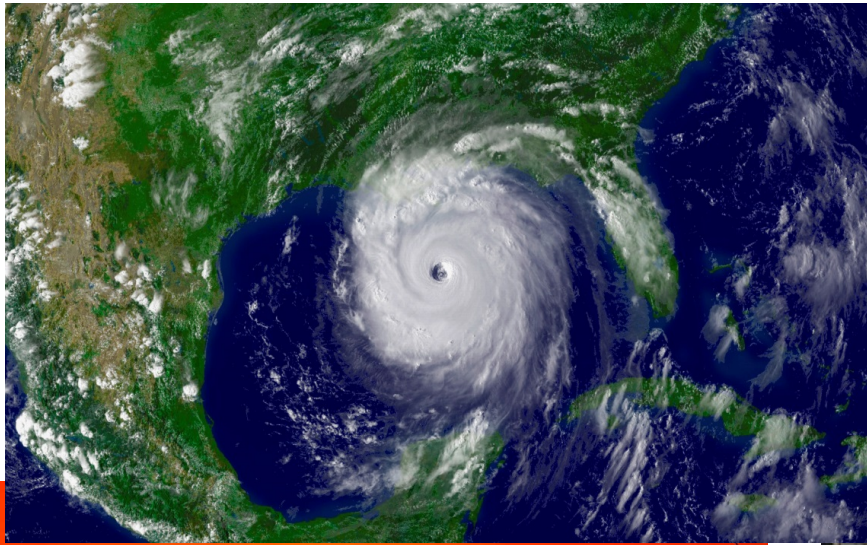
Por ahora **ningún modelo sugiere un colapso total**, pero hay procesos importantes que podrían no estar bien representados en los modelos



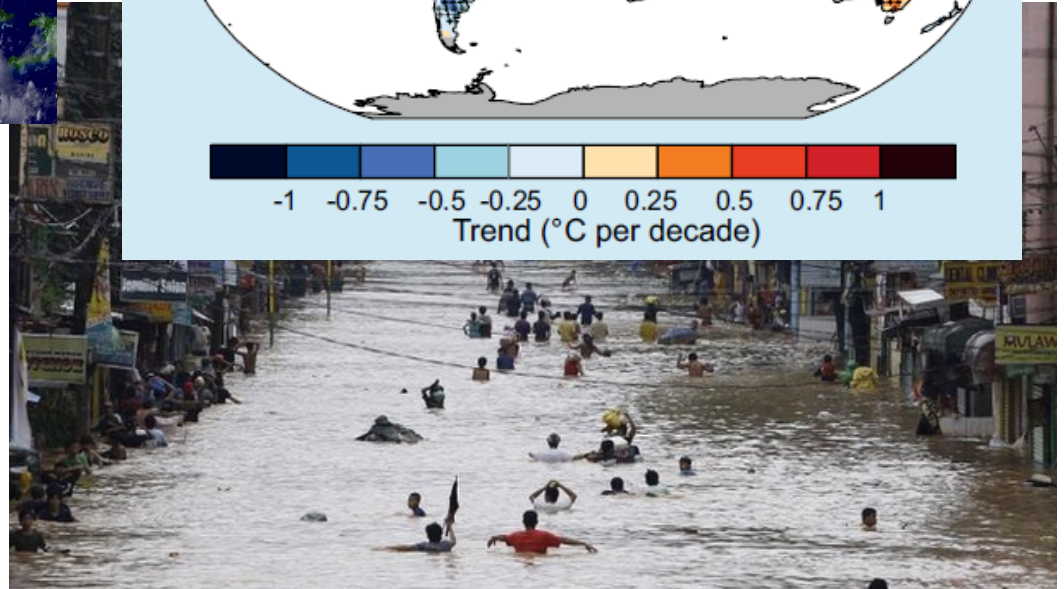
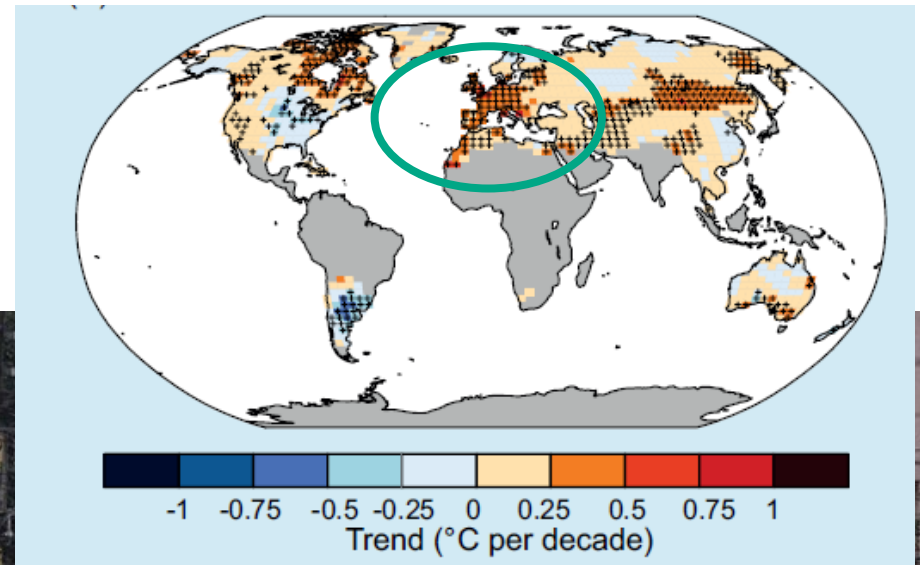
# Clima Futuro: Incógnitas

¿Está aumentando la frecuencia de fenómenos extremos?

Actualmente es difícil hacer atribución debido a los pocos eventos observados para hacer estimaciones estadísticas robustas



Aumento olas de calor en Europa  
(1951-2010)



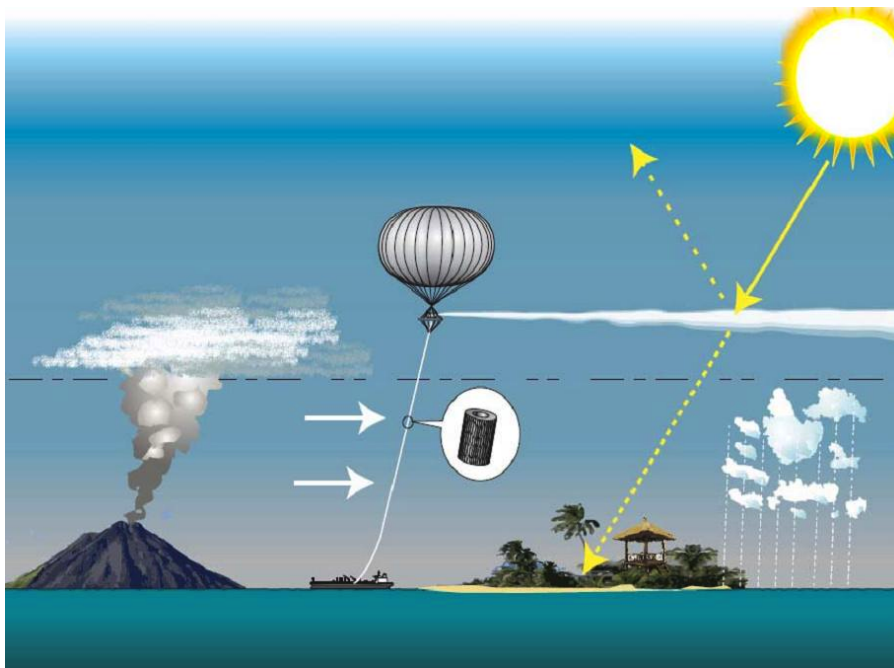
Tampoco sabemos si los modelos los representan de una forma realista



# Clima Futuro: ¿Es posible combatir el cambio climático?

## Ingeniería climática

*Inyección de partículas estratosféricas para reproducir el efecto de un volcán*



Kliuchevskoi Volcano (Kamchatka)





# Clima Futuro: ¿Es posible combatir el cambio climático?

## Ingeniería climática

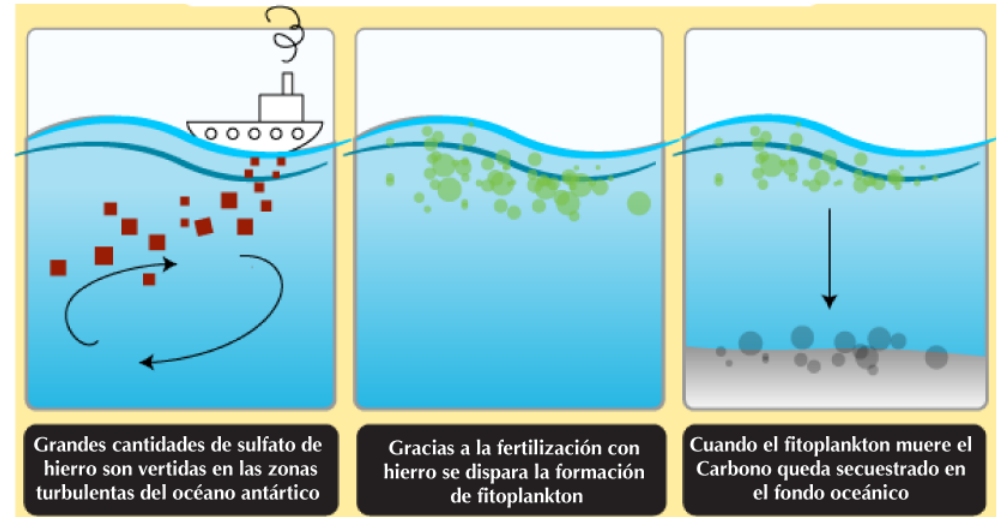
### Reforestación/Aforestación



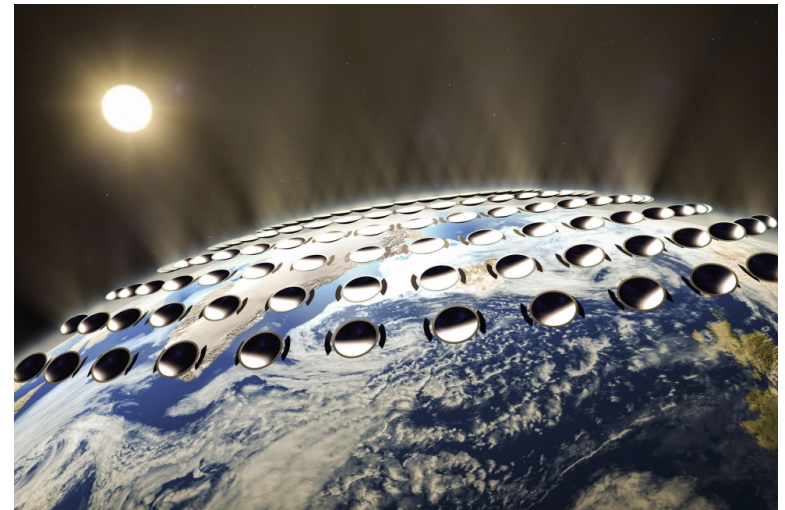
### Uso de cultivos más reflectantes



### Fertilización del océano antártico



### Rodear la Tierra de espejos



# Resumen: Principales Ideas

El **calentamiento global** es solo **una de las caras del cambio climático**.

**Otros impactos** a destacar en el sistema climático son:

- Pérdida del hielo Ártico / Retroceso de los glaciares
- Aumento del nivel del Mar
- Debilitamiento de la circulación oceánica

Actualmente, **estos cambios no se pueden entender sin** tener en cuenta el efecto de las **actividades humanas**

El estudio de **archivos naturales** sugiere que la **temperatura global actual** no tiene precedentes en los **últimos 100.000 años**

El **sistema climático varía de forma natural a diversas escalas**: de año a año, de década a década, y hasta de un milenio a otro





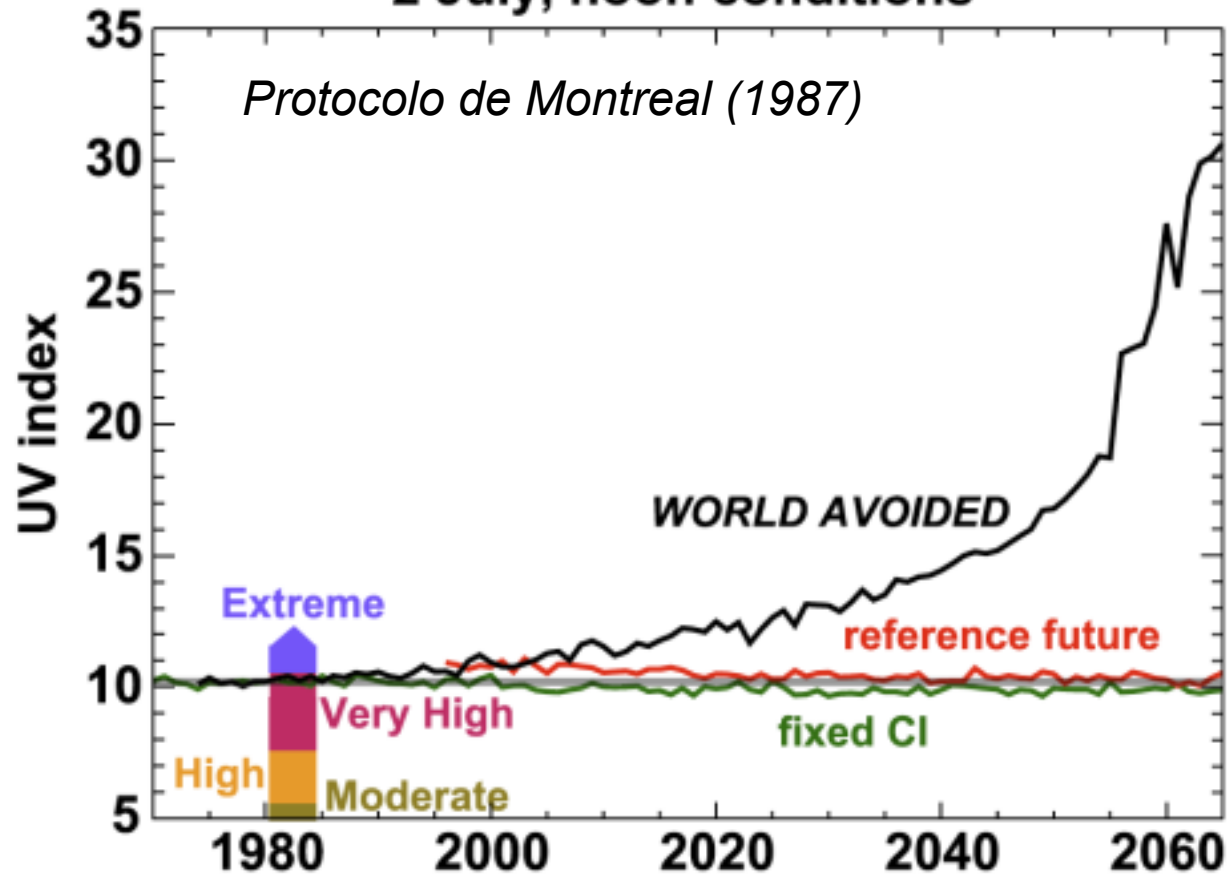
**¡Muchas gracias!**

¿Alguna pregunta?



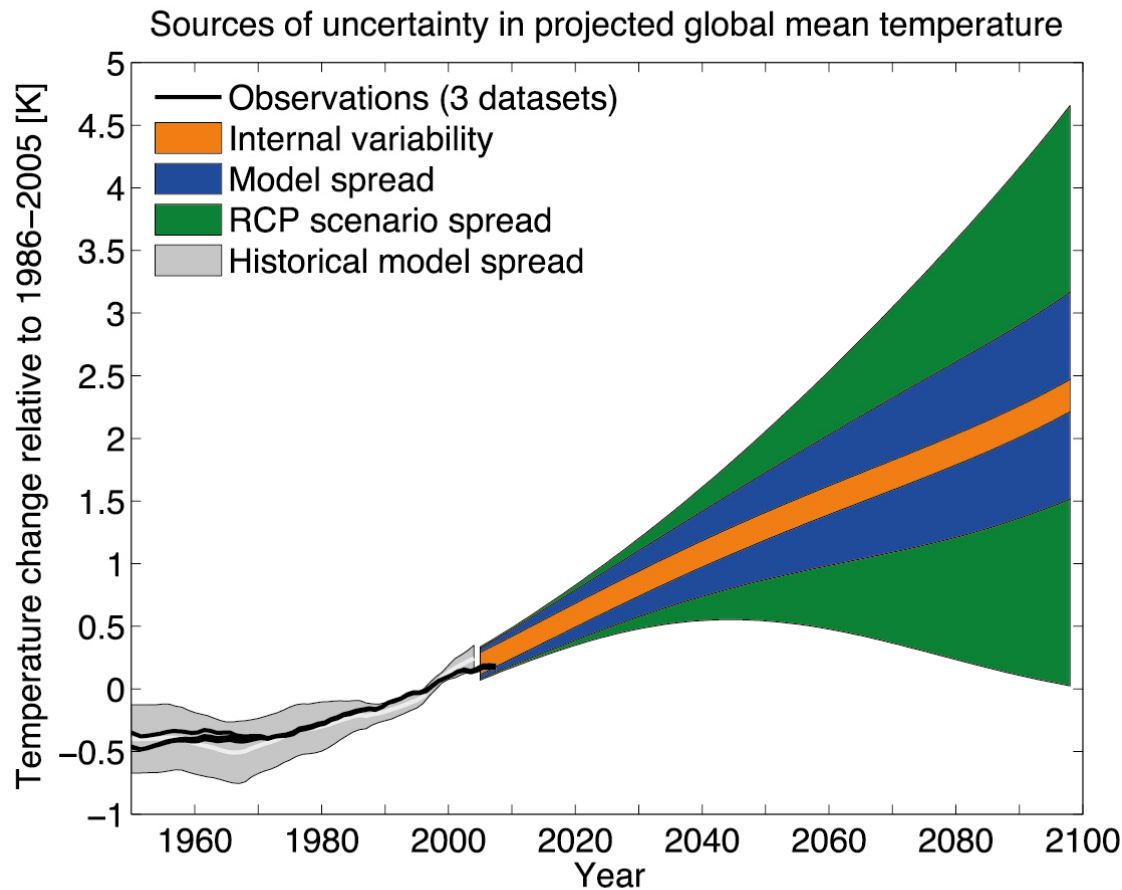
# ¿Qué podemos hacer?

Midlatitudes (30°–50°N)  
2 July, noon conditions





# Tipos de incertidumbres en las proyecciones de cambio climático



**1. Variabilidad interna (intrínseca al sistema climático)**

**2. Sensibilidad climática al forzamiento externo**  
(distinta respuesta en cada modelo)

**3. Forzamiento externo al sistema**  
(escenarios socio-económicos)

